NORME INTERNATIONALE

INTERNATIONAL STANDARD

CEI
IEC
61642

Première édition
First edition
1997-09

Réseaux industriels à courant alternatif affectés par les harmoniques – Emploi de filtres et de condensateurs shunt

Industrial a.c. networks affected by harmonics – Application of filters and shunt capacitors



Numéro de référence
Reference number
CEI/IEC 61642:1997

Numéros des publications

Depuis le 1er janvier 1997, les publications de la CEI sont numérotées à partir de 60000.

Numbering

As from the 1st January 1997 all IEC publications are issued with a designation in the 60000 series.

Publications consolidées

Les versions consolidées de certaines publications de la CEI incorporant les amendements sont disponibles. Par exemple, les numéros d'édition 1.0, 1.1 et 1.2 indiquent respectivement la publication de base, la publication de base incorporant l'amendement 1, et la publication de base incorporant les amendements 1 et 2.

Consolidated publications

Consolidated versions of some IEC publications including amendments are available. For example, edition numbers 1.0, 1.1 and 1.2 refer, respectively, to the base publication, the base publication incorporating amendment 1 and the base publication incorporating amendments 1 and 2.

Validité de la présente publication

Le contenu technique des publications de la CEI est constamment revu par la CEI afin qu'il reflète l'état actuel de la technique.

Des renseignements relatifs à la date de reconfirmation de la publication sont disponibles dans le Catalogue de la CEI.

Les renseignements relatifs à ces révisions, à l'établissement des éditions révisées et aux amendements peuvent être obtenus auprès des Comités nationaux de la CEI et dans les documents ci-dessous:

- **Bulletin de la CEI**
- **Annuaire de la CEI**
  Accès en ligne*
- **Catalogue des publications de la CEI**
  Publié annuellement et mis à jour régulièrement
  (Accès en ligne)*

Validity of this publication

The technical content of IEC publications is kept under constant review by the IEC, thus ensuring that the content reflects current technology.

Information relating to the date of the reconfirmation of the publication is available in the IEC catalogue.

Information on the revision work, the issue of revised editions and amendments may be obtained from IEC National Committees and from the following IEC sources:

- **IEC Bulletin**
- **IEC Yearbook**
  On-line access*
- **Catalogue of IEC publications**
  Published yearly with regular updates
  (On-line access)*

Terminologie, symboles graphiques et littéraux

En ce qui concerne la terminologie générale, le lecteur se reportera à la CEI 60050: *Vocabulaire Electrotechnique International* (VEI).

Pour les symboles graphiques, les symboles littéraux et les signes d'usage général approuvés par la CEI, le lecteur consultera la CEI 60027: *Symboles littéraux à utiliser en électrotechnique,* la CEI 60417: S*ymboles graphiques utilisables sur le matériel. Index, relevé et compilation des feuilles individuelles,* et la CEI 60617: *Symboles graphiques pour schémas.*

Terminology, graphical and letter symbols

For general terminology, readers are referred to IEC 60050: *International Electrotechnical Vocabulary* (IEV).

For graphical symbols, and letter symbols and signs approved by the IEC for general use, readers are referred to publications IEC 60027: *Letter symbols to be used in electrical technology*, IEC 60417: *Graphical symbols for use on equipment. Index, survey and compilation of the single sheets* and IEC 60617: *Graphical symbols for diagrams.*

Publications de la CEI établies par le même comité d'études

L'attention du lecteur est attirée sur les listes figurant à la fin de cette publication, qui énumèrent les publications de la CEI préparées par le comité d'études qui a établi la présente publication.

IEC publications prepared by the same technical committee

The attention of readers is drawn to the end pages of this publication which list the IEC publications issued by the technical committee which has prepared the present publication.

* Voir adresse «site web» sur la page de titre.

* See web site address on title page.

NORME INTERNATIONALE

INTERNATIONAL STANDARD

CEI
IEC
61642

Première édition
First edition
1997-09

Réseaux industriels à courant alternatif affectés par les harmoniques – Emploi de filtres et de condensateurs shunt

Industrial a.c. networks affected by harmonics – Application of filters and shunt capacitors

International Electrotechnical Commission 3, rue de Varembé Geneva, Switzerland
Telefax: +41 22 919 0300 e-mail: inmail@iec.ch IEC web site http: //www.iec.ch



Commission Electrotechnique Internationale
International Electrotechnical Commission
Международная Электротехническая Комиссия

CODE PRIX
PRICE CODE U

Pour prix, voir catalogue en vigueur
For price, see current catalogue

SOMMAIRE

CONTENTS

COMMISSION ÉLECTROTECHNIQUE INTERNATIONALE

RÉSEAUX INDUSTRIELS À COURANT ALTERNATIF AFFECTÉS PAR LES HARMONIQUES – EMPLOI DE FILTRES ET DE CONDENSATEURS SHUNT

AVANT-PROPOS

1) La CEI (Commission Electrotechnique Internationale) est une organisation mondiale de normalisation composée de l'ensemble des comités électrotechniques nationaux (Comités nationaux de la CEI). La CEI a pour objet de favoriser la coopération internationale pour toutes les questions de normalisation dans les domaines de l'électricité et de l'électronique. A cet effet, la CEI, entre autres activités, publie des Normes internationales. Leur élaboration est confiée à des comités d'études, aux travaux desquels tout Comité national intéressé par le sujet traité peut participer. Les organisations internationales, gouvernementales et non gouvernementales, en liaison avec la CEI, participent également aux travaux. La CEI collabore étroitement avec l'Organisation Internationale de Normalisation (ISO), selon des conditions fixées par accord entre les deux organisations.
2) Les décisions ou accords officiels de la CEI concernant les questions techniques représentent, dans la mesure du possible un accord international sur les sujets étudiés, étant donné que les Comités nationaux intéressés sont représentés dans chaque comité d'études.
3) Les documents produits se présentent sous la forme de recommandations internationales. Ils sont publiés comme normes, rapports techniques ou guides et agréés comme tels par les Comités nationaux.
4) Dans le but d'encourager l'unification internationale, les Comités nationaux de la CEI s'engagent à appliquer de façon transparente, dans toute la mesure possible, les Normes internationales de la CEI dans leurs normes nationales et régionales. Toute divergence entre la norme de la CEI et la norme nationale ou régionale correspondante doit être indiquée en termes clairs dans cette dernière.
5) La CEI n'a fixé aucune procédure concernant le marquage comme indication d'approbation et sa responsabilité n'est pas engagée quand un matériel est déclaré conforme à l'une de ses normes.
6) L'attention est attirée sur le fait que certains des éléments de la présente Norme internationale peuvent faire l'objet de droits de propriété intellectuelle ou de droits analogues. La CEI ne saurait être tenue pour responsable de ne pas avoir identifié de tels droits de propriété et de ne pas avoir signalé leur existence.

La Norme internationale CEI 61642 a été établie par le comité d'études 33 de la CEI: Condensateurs de puissance.

Le texte de la présente norme est issu des documents suivants:

FDIS	Rapport de vote
33/255/FDIS	33/274/RVD

Le rapport de vote indiqué dans le tableau ci-dessus donne toute information sur le vote ayant abouti à l'approbation de cette norme.

L'annexe A est donnée uniquement à titre d'information.

INTERNATIONAL ELECTROTECHNICAL COMMISSION

INDUSTRIAL AC NETWORKS AFFECTED BY HARMONICS – APPLICATION OF FILTERS AND SHUNT CAPACITORS

FOREWORD

1) The IEC (International Electrotechnical Commission) is a worldwide organization for standardization comprising all national electrotechnical committees (IEC National Committees). The object of the IEC is to promote international co-operation on all questions concerning standardization in the electrical and electronic fields. To this end and in addition to other activities, the IEC publishes International Standards. Their preparation is entrusted to technical committees; any IEC National Committee interested in the subject dealt with may participate in this preparatory work. International, governmental and non-governmental organizations liaising with the IEC also participate in this preparation. The IEC collaborates closely with the International Organization for Standardization (ISO) in accordance with conditions determined by agreement between the two organizations.
2) The formal decisions or agreements of the IEC on technical matters express, as nearly as possible, an international consensus of opinion on the relevant subjects since each technical committee has representation from all interested National Committees.
3) The documents produced have the form of recommendations for international use and are published in the form of standards, technical reports or guides and they are accepted by the National Committees in that sense.
4) In order to promote international unification, IEC National Committees undertake to apply IEC International Standards transparently to the maximum extent possible in their national and regional standards. Any divergence between the IEC Standard and the corresponding national or regional standard shall be clearly indicated in the latter.
5) The IEC provides no marking procedure to indicate its approval and cannot be rendered responsible for any equipment declared to be in conformity with one of its standards.
6) Attention is drawn to the possibility that some of the elements of this International Standard may be the subject of patent rights. The IEC shall not be held responsible for identifying any or all such patent rights.

International Standard IEC 61642 has been prepared by IEC technical committee 33: Power capacitors.

The text of this standard is based on the following documents:

FDIS	Report on voting
33/255/FDIS	33/274/RVD

Full information on the voting for the approval of this standard can be found in the report on voting indicated in the above table.

Annex A is for information only.

RÉSEAUX INDUSTRIELS À COURANT ALTERNATIF AFFECTÉS PAR LES HARMONIQUES – EMPLOI DE FILTRES ET DE CONDENSATEURS SHUNT

1 Généralités

1.1 *Domaine d'application et objet*

La présente Norme internationale donne des indications pour l'utilisation des filtres passifs à courant alternatif et des condensateurs shunt destinés à la limitation des harmoniques et à la correction du facteur de puissance dans les installations industrielles à basse et haute tension. Les dispositions prévues dans cette norme sont applicables aux harmoniques dont le rang est supérieur à 1 et inférieur ou égal à 25.

Les condensateurs suivants sont exclus de cette norme:

– les condensateurs pour les installations de génération de chaleur par induction soumis à des fréquences comprises entre 40 Hz et 24 000 Hz (voir la CEI 60110 [1]*);

– les condensateurs série destinés à être installés sur des réseaux (voir la CEI 60143 [2]);

– les condensateurs de couplage et les diviseurs capacitifs (voir la CEI 60358 [3]);

– les condensateurs pour l'électronique de puissance (voir la CEI 61071 [4]);

– les condensateurs des moteurs à courant alternatif (voir la CEI 60252 [5]);

– les condensateurs destinés à être utilisés dans les circuits de lampes tubulaires à fluorescence et autres lampes à décharge (voir la CEI 61048 [6] et la CEI 61049 [7]);

– les condensateurs d'antiparasitage radioélectrique;

– les condensateurs destinés à être utilisés dans différents types d'équipements électriques et considérés de ce fait comme des composants;

– les condensateurs destinés à être utilisés sous tension continue superposée à la tension alternative;

– les condensateurs destinés à être utilisés dans les fours à arc.

L'objet de la présente norme est d'identifier les problèmes et de donner des recommandations pour les applications générales des condensateurs et des filtres d'harmoniques à courant alternatif dans les réseaux d'énergie à courant alternatif affectés par la présence de tensions et de courants harmoniques.

1.2 *Références normatives*

Les documents normatifs suivants contiennent des dispositions qui, par suite de la référence qui y est faite, constituent des dispositions valables pour la présente Norme internationale. Au moment de la publication, les éditions indiquées étaient en vigueur. Tout document normatif est sujet à révision et les parties prenantes aux accords fondés sur la présente Norme internationale sont invitées à rechercher la possibilité d'appliquer les éditions les plus récentes des documents normatifs indiqués ci-après. Les membres de la CEI et de l'ISO possèdent le registre des Normes internationales en vigueur.

CEI 60050(131):1978, *Vocabulaire Electrotechnique International (VEI) – Chapitre 131: Circuits électriques et magnétiques*

---

* Les chiffres entre crochets renvoient à la bibliographie donnée en annexe A.

INDUSTRIAL AC NETWORKS AFFECTED BY HARMONICS – APPLICATION OF FILTERS AND SHUNT CAPACITORS

1 General

1.1 *Scope and object*

This International Standard gives guidance for the use of passive a.c. harmonic filters and shunt capacitors for the limitation of harmonics and power factor correction intended to be used in industrial applications, at low and high voltages. The measures proposed in this standard are applicable to harmonic orders greater than 1 and up to and including 25.

The following capacitors are excluded from this standard:

– capacitors for inductive heat generating plants, operating at frequencies between 40 Hz and 24 000 Hz (see IEC 60110 [1]*);

– series capacitors for power systems (see IEC 60143 [2]);

– coupling capacitors and capacitor dividers (see IEC 60358 [3]);

– power electronic capacitors (see IEC 61071 [4]);

– AC motor capacitors (see IEC 60252 [5]);

– capacitors for use in tubular fluorescent and other discharge lamp circuits (see IEC 61048 [6] and IEC 61049 [7]);

– capacitors for the suppression of radio interference;

– capacitors intended to be used in various types of electric equipment and thus considered as components;

– capacitors intended for use with d.c. voltage superimposed on a.c. voltage;

– capacitors intended for use with arc furnaces.

The object of this standard is to identify problems and give recommendations for general applications of capacitors and a.c. harmonic filters in a.c. power systems affected by the presence of harmonic voltages and currents.

1.2 *Normative references*

The following normative documents contain provisions which, through reference in this text, constitute provisions of this International Standard. At the time of publication, the editions indicated were valid. All normative documents are subjected to revision, and parties to agreements based on this International Standard are encouraged to investigate the possibility of applying the most recent editions of the normative documents indicated below. Members of IEC and ISO maintain registers of currently valid International Standards.

IEC 60050(131):1978, *International Electrotechnical Vocabulary (IEV) – Chapter 131: Electric and magnetic circuits*

* Figures in square brackets refer to the bibliography given in annex A.

CEI 60050(161):1990, *Vocabulaire Electrotechnique International (VEI) – Chapitre 161: Compatibilité électromagnétique*

1.3 *Définitions*

Pour les besoins de la présente Norme internationale, les définitions suivantes s'appliquent.

1.3.1 **harmonique:** Un des éléments qui résultent de la décomposition en série de Fourier de l'onde périodique d'un courant ou d'une tension. [VEI 161-02-18 modifiée]

1.3.2 **rang harmonique, *h*:** Rapport de la fréquence d'un harmonique (f_h) à la fréquence fondamentale (nominale) du réseau (f_1). [VEI 161-02-19 modifiée]

1.3.3 **harmoniques caractéristiques:** Harmoniques produits par les convertisseurs statiques au cours de leur fonctionnement théoriquement idéal. Le rang des harmoniques caractéristiques des convertisseurs statiques c.a./c.c. est donné par $h = mp \pm 1$, où p est l'indice de pulsation du convertisseur et m tout nombre entier. Par exemple, un convertisseur à six pulsations génère les rangs harmoniques h = 5, 7, 11, 13, 17, 19 ...

1.3.4 **harmoniques non caractéristiques:** Harmoniques résultant d'un déséquilibre dans le réseau d'alimentation c.a. ou d'un retard asymétrique de l'angle d'allumage du convertisseur. Ils peuvent aussi être produits par d'autres dispositifs non linéaires ou variables dans le temps, par exemple par des variateurs de fréquence, des lampes fluorescentes, des fours à arc, des machines à souder électriques, etc.

1.3.5 **facteur de puissance:** Rapport de la puissance active à la puissance apparente. [VEI 131-03-20]

1.3.6 **facteur de déphasage:** Rapport de la puissance active à la fréquence fondamentale à la puissance apparente à la fréquence fondamentale. [VEI 131-03-21 modifiée]

1.3.7 **taux de distorsion:** Rapport de la valeur efficace du contenu harmonique à la valeur efficace du fondamental, exprimé en pourcentage de cette dernière. [VEI 131-03-04 modifiée]

$$DF = \frac{(\text{somme des carrés des valeurs efficaces des harmoniques})^{1/2}}{\text{valeur efficace du fondamental}}\ 100\ \%$$

1.3.8 **filtre:** Equipement généralement composé d'inductances, de condensateurs et de résistances si nécessaire, accordé de façon à présenter une impédance connue dans une bande de fréquences donnée.

1.3.9 **fréquence d'accord:** Fréquence pour laquelle l'impédance du filtre, calculée à partir des valeurs assignées, présente une valeur minimale ou maximale.

1.3.10 **filtre accordé:** Filtre dont la fréquence d'accord ne diffère pas de plus de 10 % de la fréquence à filtrer.

1.3.11 **filtre non accordé:** Filtre dont la fréquence d'accord est inférieure d'au moins 10 % à la première fréquence harmonique présentant une amplitude importante en courant/tension.

NOTE – En français, ou emploie couramment le terme «condensateur avec inductance anti-harmonique».

1.3.12 **filtre amorti:** Filtre présentant une faible impédance, à prédominance résistive, dans une large bande de fréquences.

IEC 60050(161):1990, *International Electrotechnical Vocabulary (IEV) – Chapter 161: Electromagnetic compatibility*

1.3 *Definitions*

For the purpose of this International Standard, the following definitions apply.

1.3.1 **harmonic**: The component of the Fourier-series decomposition of a voltage or current periodic wave. [IEV 161-02-18 modified]

1.3.2 **harmonic order, *h***: The ratio of the frequency of a harmonic (f_h) to the fundamental (rated) network frequency (f_1). [IEV 161-02-19 modified]

1.3.3 **characteristic harmonics**: Those harmonics produced by static converters in the course of theoretically ideal operation. The characteristic-harmonic order of static a.c./d.c. converters is given by $h = mp \pm 1$, where p is the pulse number of the converter and m is any integer. For example, the six-pulse converter circuit has characteristic harmonics with order numbers h = 5, 7, 11, 13, 17, 19....

1.3.4 **non-characteristic harmonics**: Those harmonics which are produced as a result of imbalance in the a.c. power system or asymmetrical delay of firing angle of the converter. They are also produced by other non-linear, time-varying devices, for example frequency changers, fluorescent lamps, arc furnaces, electric welding machines, etc.

1.3.5 **power factor**: The ratio of the active power to the apparent power. [IEV 131-03-20]

1.3.6 **displacement factor**: The ratio of the active power of the fundamental wave to the apparent power of the fundamental wave. [IEV 131-03-21 modified]

1.3.7 **distortion factor**: The ratio of the root-mean-square value of the harmonic content to the root-mean-square value of the fundamental quantity, expressed as a percentage of the fundamental. [IEV 131-03-04 modified]

$$DF = \frac{(\text{sum of the squares of r.m.s values of the harmonics})^{1/2}}{\text{r.m.s. value of the fundamental}} \quad 100\ \%$$

1.3.8 **filter**: An equipment generally constituted of reactors, capacitors and resistors if required, tuned to present a known impedance over a given frequency range.

1.3.9 **tuning frequency**: The frequency for which the filter impedance, calculated from the rated values, has a minimum or maximum value.

1.3.10 **tuned filter**: A filter with a tuning frequency which differs by no more than 10 % from the frequency which is to be filtered.

1.3.11 **detuned filter**: A filter with a tuning frequency more than 10% below the lowest harmonic frequency with considerable current/voltage amplitude.

1.3.12 **damped filter**: A filter with low, predominantly resistive, impedance over a wide band of frequencies.

1.3.13 **installation de télécommande centralisée:** Installation destinée à injecter des signaux à fréquence musicale sur le réseau à haute tension (HT) afin de commander des récepteurs sur le réseau à basse tension (BT).

1.3.14 **tension de référence:** Tension à laquelle se réfèrent les calculs d'impédance.

1.4 *Généralités*

1.4.1 *Harmoniques en courant alternatif*

En général, les courants harmoniques sont produits dans les réseaux d'énergie lorsque les charges sont non linéaires ou variables en fonction du temps. Les convertisseurs statiques constituent l'une des sources principales d'harmoniques dans les réseaux industriels.

Il existe deux types de courants harmoniques générés par des convertisseurs: les harmoniques caractéristiques et les harmoniques non caractéristiques. Les harmoniques caractéristiques dépendent fortement du circuit du convertisseur et ont un spectre de fréquence constant. Leur amplitude est approximativement inversement proportionnelle au rang harmonique.

Les sources principales d’harmoniques non caractéristiques sont les variateurs de fréquence, bien que de faibles pourcentages d'harmoniques non caractéristiques puissent résulter d'un déséquilibre du réseau (tension et impédance) et d'un décalage de l'angle d'allumage du convertisseur.

Les redresseurs pour les variateurs à courant continu constituent, le plus souvent, des sources d'harmoniques caractéristiques.

L'effet des charges non linéaires ou variables en fonction du temps peut être amplifié sous certaines conditions liées à la configuration du réseau d'alimentation, par exemple par des résonances. En fonction de l'état du réseau et de l'effet amplificateur des résonances, la tension d'alimentation peut être soumise à des distorsions, même dans les installations électriques où des charges non linéaires et des charges variables en fonction du temps sont absentes ou ne représentent qu'une faible partie de la puissance totale.

Les harmoniques augmentent les pertes dans les réseaux d’énergie et peuvent affecter le bon fonctionnement des divers équipements, en particulier les circuits électroniques.

En vue de maintenir les perturbations dues aux harmoniques à un niveau acceptable, des règlements locaux, ainsi que des normes nationales et internationales peuvent spécifier les limites admissibles de la distorsion harmonique. On peut utiliser des filtres pour réduire la distorsion harmonique.

1.4.2 *Puissance réactive*

En général, la puissance réactive absorbée par les installations est due à des charges inductives et à des convertisseurs statiques.

Dans un réseau, le facteur de puissance global est défini pour obtenir le fonctionnement le plus économique possible de l'installation, ou est imposé par le distributeur d'énergie. La tarification de l'énergie peut donner lieu à des pénalités lorsque le facteur de puissance est trop faible. Il est par conséquent recommandé de compenser la puissance réactive absorbée en insérant des équipements de compensation appropriés.

Des condensateurs shunt sont normalement utilisés pour améliorer le facteur de puissance. S'il y a des harmoniques sur le réseau, des surtensions et/ou des surintensités indésirables peuvent survenir. De plus, l'installation de télécommande centralisée peut être perturbée. Dans ces cas là, on peut utiliser des filtres au lieu des seuls condensateurs shunt.

1.3.13 **ripple control installation**: An installation to inject audio-frequency signals into the high voltage (HV) network in order to control receivers on the low voltage (LV) network.

1.3.14 **reference voltage**: The voltage to which the impedance calculations are referred.

1.4 *General considerations*

1.4.1 *AC harmonics*

Harmonic currents in power networks are produced, in general, when the loads are non-linear or time-varying. One of the main sources of harmonics in industrial networks are static converters.

There are two groups of converter a.c. current harmonics: characteristic and non-characteristic. The characteristic harmonics correlate strongly with the converter circuit and have a constant frequency spectrum. Their magnitude is approximately in inverse proportion to the harmonic number.

The main sources of non-characteristic harmonics are frequency changers, although small amounts of non-characteristic harmonics can result from system imbalances (voltage and impedance) and imbalance in the converter firing angle.

The rectifiers for d.c. drives produce mostly characteristic harmonics.

The effect of non-linear and time-varying loads can be amplified under certain conditions of the electrical supply-network, for example by resonances. Depending on the network conditions and on the amplification effect of the resonances, the supply voltage can be distorted even in electrical installations where non-linear and time-varying loads are absent or represent a small part of the total utility power.

Harmonics increase the losses in power networks and may affect the correct operation of various equipments, in particular electronic circuits.

To keep the harmonic disturbances to an acceptable level, local requirements and national and international standards may specify limits for the harmonic distortion. For the reduction of harmonic distortion, filters can be used.

1.4.2 *Reactive power*

In general, the reactive power flowing in networks is caused by inductive loads and static converters.

In a network the power factor is determined by the most economical use of the distribution system or is imposed by the utility. Penalties may be imposed through the tariff structure for poor power factor. It is therefore advisable to compensate the inductive reactive power by fitting suitable compensating equipments.

For power factor correction shunt capacitors are normally used. If there are harmonics in the network, unwanted overvoltages and/or overcurrents can appear. In addition, ripple control installations may be disturbed. In these cases, filters can be used in place of shunt capacitors alone.

2 Problèmes et solutions concernant la résonance

2.1 *Introduction*

Les réseaux électriques comportent différents composants raccordés entre eux, par exemple, générateurs, lignes, câbles, transformateurs, condensateurs et charges.

L'impédance du réseau en un point dépend de la fréquence, des éléments du réseau et de sa configuration.

Le montage en série d'une inductance et d'une capacité conduit à une impédance très faible dans une certaine gamme de fréquences, proche de la fréquence de résonance. Cet effet est appelé résonance série.

Le montage en parallèle d'une inductance et d'une capacité conduit à une impédance très élevée dans une certaine gamme de fréquences, proche de la fréquence de résonance. Cet effet est appelé résonance parallèle.

Une résonance série et une résonance parallèle peuvent apparaître sur le même réseau, dans une plage de fréquences étendue.

Si de tels circuits résonants sont excités par des sources harmoniques de courant ou de tension, une amplification des tensions et courants peut alors se produire et perturber, surcharger, voire détruire des éléments du réseau.

La figure 1 donne l'exemple d'un réseau simplifié et son schéma unifilaire équivalent.

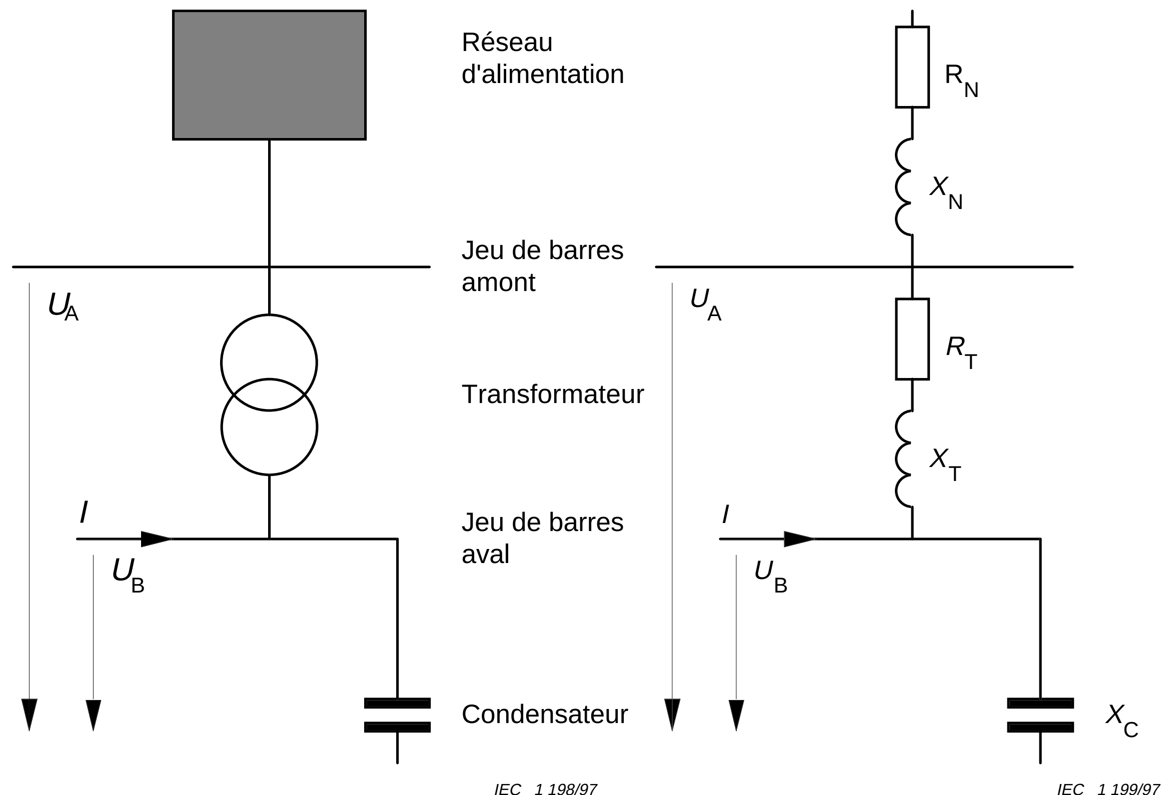


Figure 1 – Réseau simplifié et schéma unifilaire

2 Resonance problems and solutions

2.1 *Introduction*

In electrical networks, different components are connected together, for example generators, power lines, cables, transformers, capacitors and loads.

The impedance at any point of the network is dependent on the frequency, on the components and on the configuration.

The series connection of an inductance and a capacitance will result in a very low impedance in a certain frequency range, close to the resonance frequency. This effect is called series resonance.

The parallel connection of an inductance and a capacitance will result in a very high impedance in a certain frequency range, close to the resonance frequency. This effect is called parallel resonance.

Series resonance and parallel resonance may occur in the same network over a wide range of frequencies.

If harmonic voltage- or current-sources excite such resonance circuits, an amplification of voltages and currents may occur which can disturb, overload or even destroy network components.

An example of a simplified network and its one-line diagram is shown in figure 1.

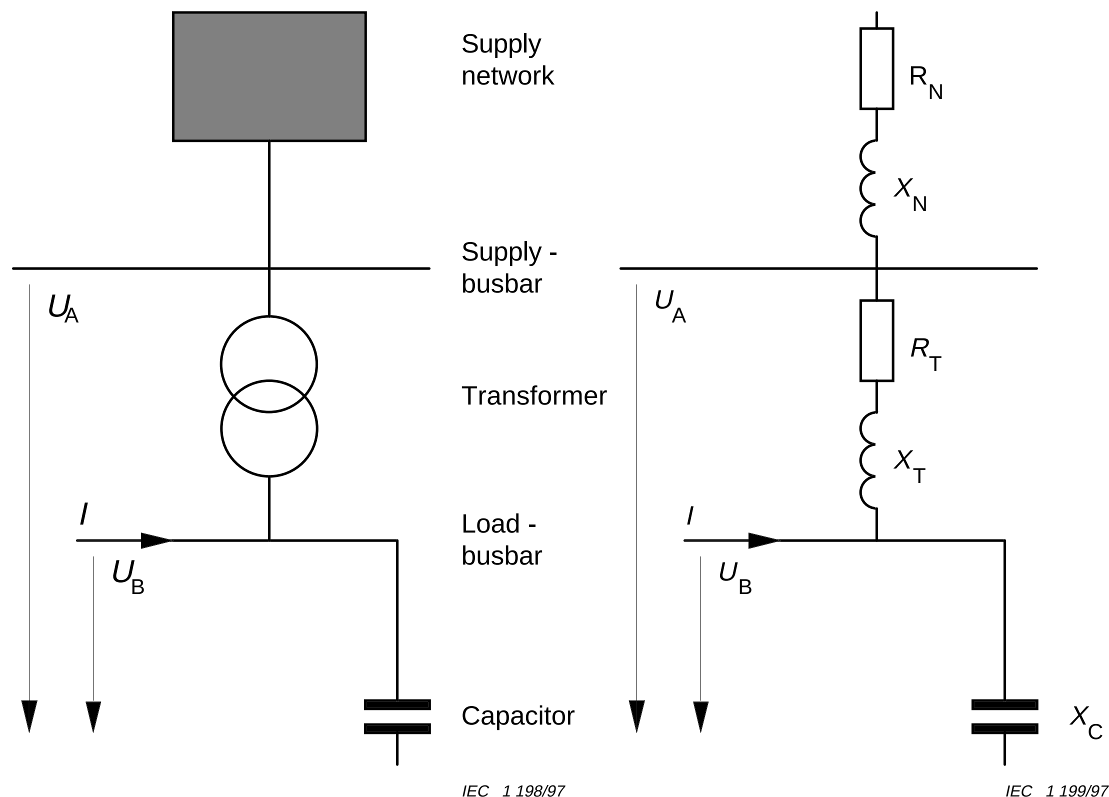


Figure 1 – Simplified network and one-line diagram

Cet exemple se compose du réseau d'alimentation, d'un jeu de barres amont (côté haute tension), d'un transformateur, d'un jeu de barres aval (côté basse tension) et d'un condensateur. La source des courants harmoniques peut être un variateur commandé par un pont à six pulsations. De plus, il peut y avoir des tensions harmoniques sur le réseau lui-même, dues à d'autres sources harmoniques de courant.

2.2 *Impédance vue de l'amont du réseau d'alimentation, impédance vue du jeu de barres aval*

Pour analyser le comportement d'un réseau vis-à-vis des harmoniques, il est utile de considérer au moins deux impédances:

– l'impédance vue depuis l'amont du réseau d'alimentation (voir figure 1).

Cet aspect est utile pour analyser les charges capacitive et inductive en présence des tensions et des courants harmoniques sur le jeu de barres amont, pour calculer l'impédance aux fréquences utilisées par la télécommande centralisée et pour évaluer les tensions harmoniques (qualité de la tension) qui apparaissent sur le jeu de barres aval;

– l'impédance vue depuis le jeu de barres aval (voir figure 1).

Cet aspect est utile pour analyser les charges capacitive et inductive en présence des sources de courants harmoniques sur le jeu de barres aval et pour calculer les tensions harmoniques (qualité de la tension) qui en résultent sur ce jeu de barres.

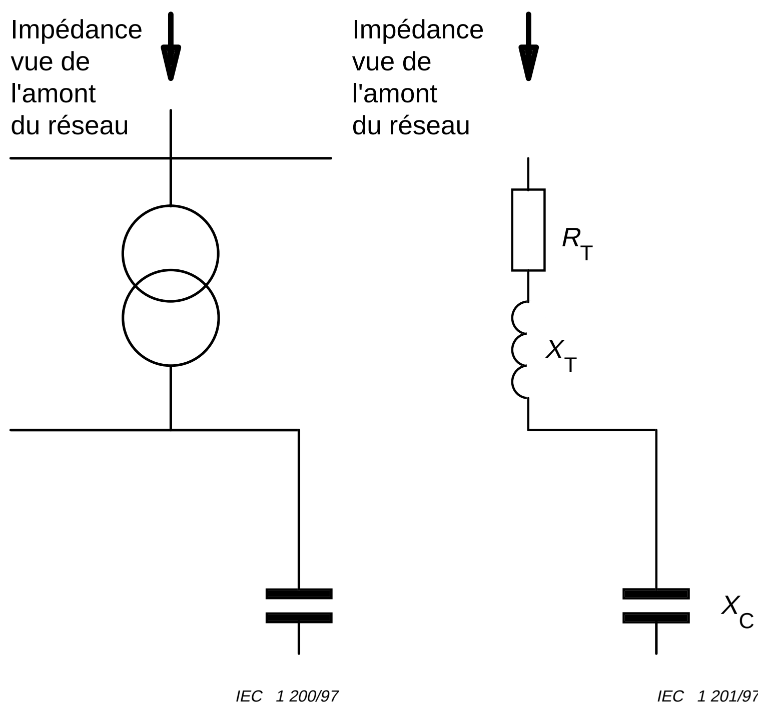


Figure 2a – Impédance vue de l'amont du réseau et schéma unifilaire

This example consists of the supply network, a supply-busbar (on the high-voltage side), a transformer, a load-busbar (on the low-voltage side) and a capacitor. The source of harmonic currents may be a drive which is controlled by a six-pulse rectifier. Harmonic voltages may be present in the network itself due to other harmonic current sources.

2.2 *Supply impedance view, load-busbar impedance view*

To analyze the behaviour of a network with respect to harmonics, it is useful to look, at least, at two impedances:

– the supply impedance takes the view from the supply network (see figure 1).

This view is useful for the analysis of the capacitor and reactor load in the presence of harmonic voltages and currents on the supply-busbar, for the calculation of the branch impedance at ripple control-frequencies and for the evaluation of the resulting harmonic voltages (quality of the voltage) on the load-busbar;

– the load-busbar impedance takes the view from the load-busbar (see figure 1).

This view is useful for the analysis of the capacitor and reactor load in the presence of harmonic current sources on the load-busbar and for the calculation of the resulting harmonic voltages (quality of the voltage) on the load-busbar.

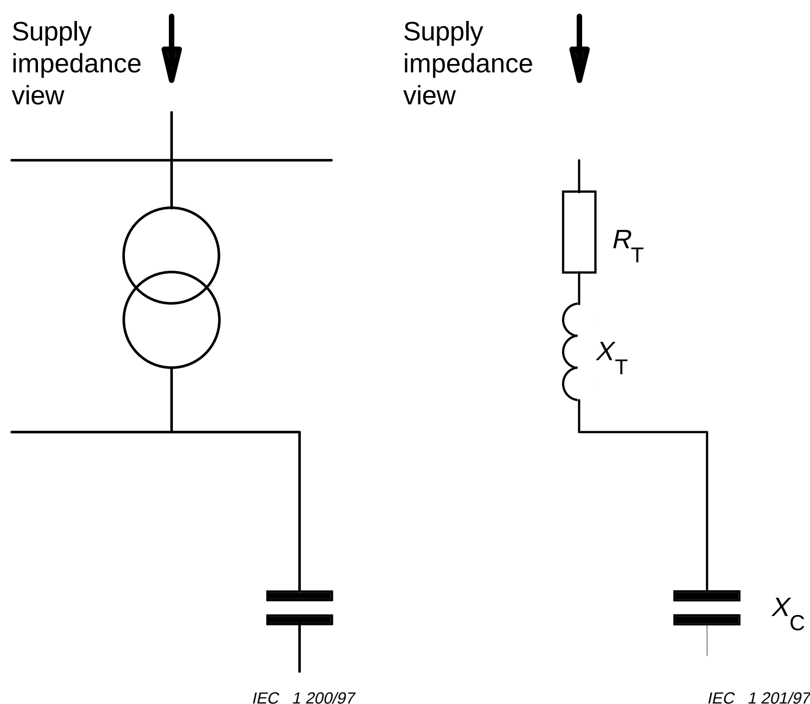


Figure 2a – Supply impedance view of a network and one-line diagram

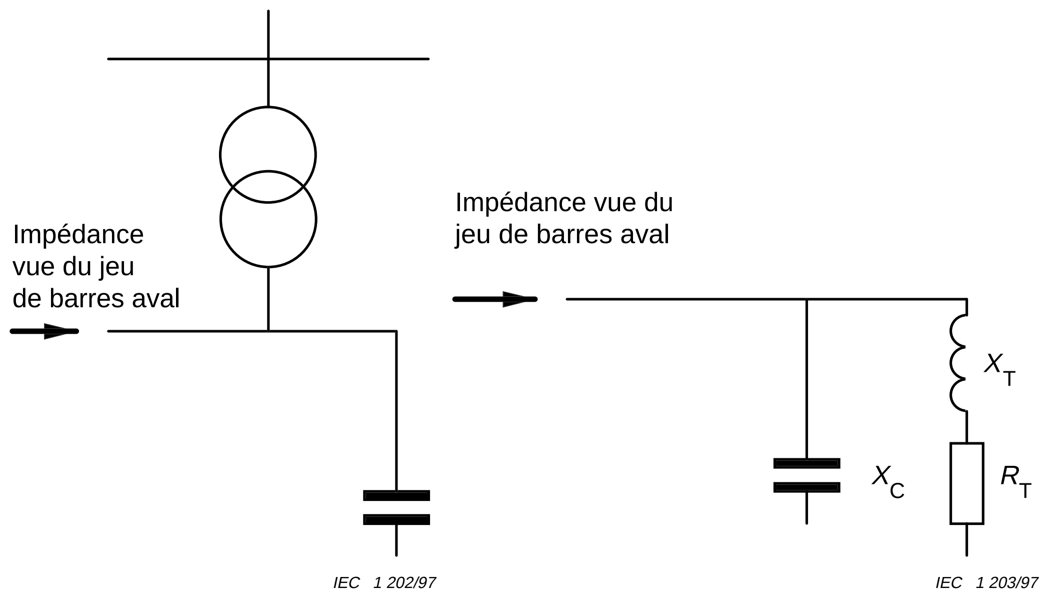


Figure 2b – Impédance vue du jeu de barres aval et schéma unifilaire

2.3 *Exemple de résonance série*

Dans l'exemple de calcul présenté ci-après, on analyse le montage en série d'un transformateur (inductance X_T et résistance R_T) et d'un condensateur. La figure 3a montre le schéma unifilaire et la figure 3b l'impédance en fonction du rang harmonique. Cela met en évidence une résonance série proche de l'harmonique 11. Le tableau 1 regroupe des valeurs typiques des impédances, tensions et courants à des fréquences harmoniques caractéristiques pour l'installation représentée sur la figure 1 comportant des tensions harmoniques [8].

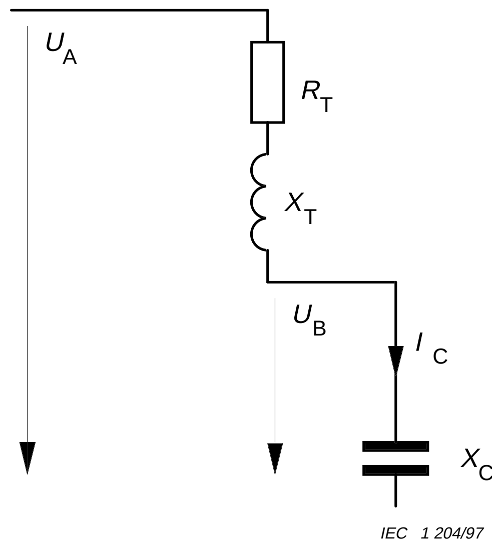


Figure 3a – Schéma unifilaire d'un circuit résonant série

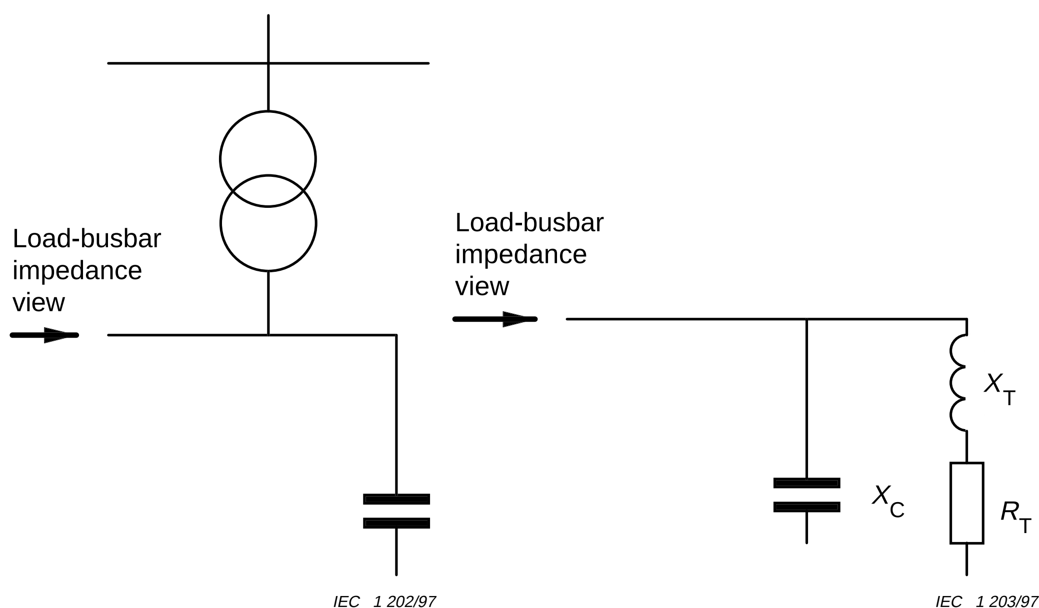


Figure 2b – Load-busbar impedance view of a network and one-line diagram

2.3 *Example of a series resonance*

In the following calculation example, the series connection of a transformer (inductance X_T and resistance R_T) and a capacitor is analyzed. Figure 3a shows the one-line diagram and figure 3b shows the impedance versus harmonic order. It shows a series resonance close to the 11th harmonic. Typical numerical results of impedances, voltages and currents at characteristic harmonic frequencies in the network shown in figure 1 with a distorted supply voltage are shown in table 1 [8].

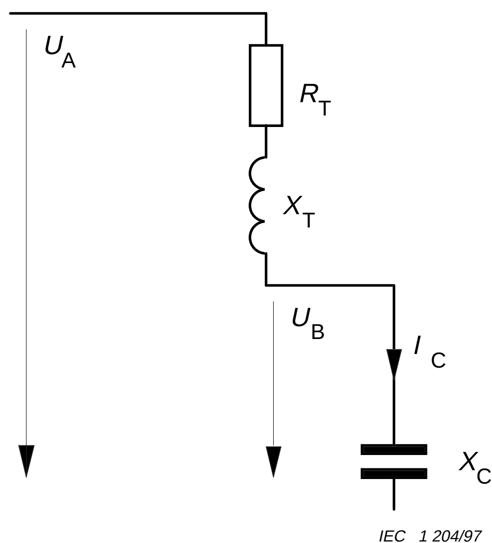


Figure 3a – One-line diagram of a series resonance circuit

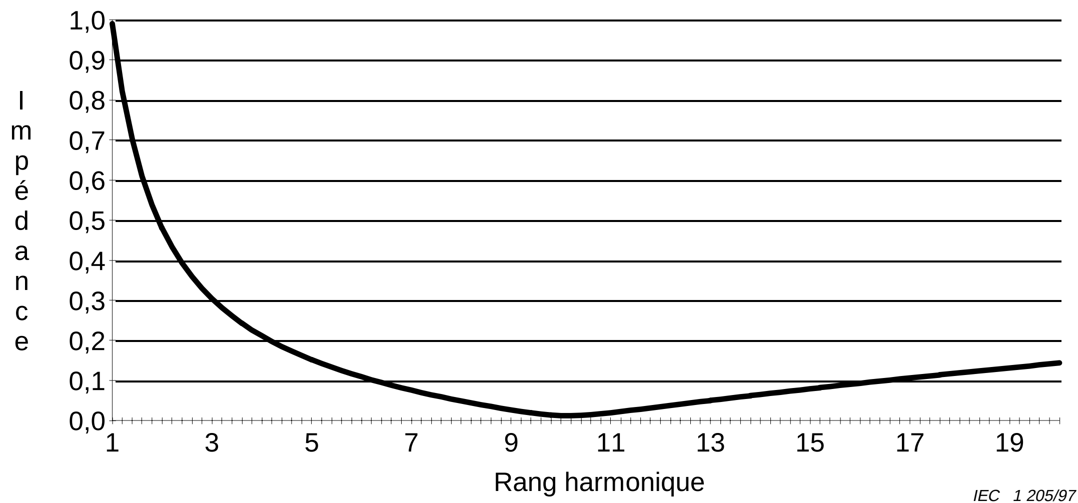


Figure 3b – Impédance en ohms du circuit représenté dans la figure 3a en fonction du rang harmonique

Légende des symboles et valeurs utilisés dans les figures 3a, 3b et dans le tableau 1.

U_N	tension de référence (dans l'exemple: 400 V triphasé)
$h = f_h/f_1$	rang harmonique, fréquence fondamentale f_1, fréquence harmonique f_h
$X_T = X_{T1} \cdot h$	réactance de court-circuit d'un transformateur de 1 000 kVA ayant une tension de court-circuit de 6 %
$Q_T = 8$	facteur de qualité du transformateur
$X_C = X_{C1}/h$	réactance d'un condensateur de 160 kvar
Z	impédance équivalente (voir figure 3a)
U_A	tension sur le jeu de barres amont. Les valeurs majorées de 60 % proviennent d'un rapport CIGRE sur les harmoniques [8]
$U_A (\%) = (U_A/U_N) \cdot 100$	
I_C	courant dans le condensateur
I_{CN}	courant assigné du condensateur
U_B	tension obtenue sur le jeu de barres aval
$U_B (\%) = (U_B/U_N) \cdot 100$	

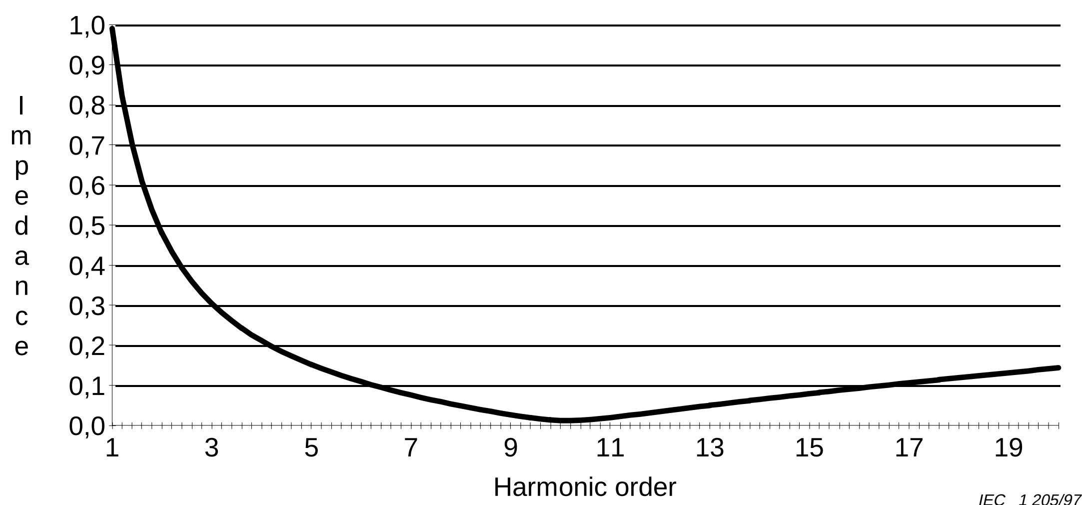


Figure 3b – Impedance in ohms versus harmonic order of the circuit shown in figure 3a

Explanation of the symbols and values used in figures 3a, 3b and table 1.

U_N	reference voltage (example: 3-phase 400 V)
$h = f_h / f_1$	harmonic order, f_1 fundamental frequency, f_h harmonic frequency
$X_T = X_{T1} \cdot h$	short-circuit reactance of a transformer of 1 000 kVA having an impedance voltage of 6 %
$Q_T = 8$	transformer quality factor
$X_C = X_{C1} / h$	reactance of a capacitor of 160 kvar
Z	equivalent impedance (see figure 3a)
U_A	voltage on the supply-busbar. The values are taken from a CIGRE report about harmonics and multiplied by 60 % [8].
$U_A(\%) = (U_A / U_N) \cdot 100$	
I_C	capacitor current
I_{CN}	rated capacitor current
U_B	resulting voltage on the load-busbar
$U_B(\%) = (U_B / U_N) \cdot 100$	

Tableau 1 – Résultats du calcul des impédances, des tensions et des courants aux rangs harmoniques caractéristiques d'un circuit présentant une résonance série et alimenté par un réseau comportant des harmoniques de tension

h	X_T Ω	X_C Ω	Z Ω	U_A V	U_A(%) %	I_C A	U_B V	U_B(%) %
1	0,010	–1,000	0,990	400,0	100,0	233	404	101,0
5	0,048	–0,200	0,152	12,0	3,0	46	16	3,9
7	0,067	–0,143	0,076	9,6	2,4	73	18	4,5
11	0,106	–0,091	0,020	6,0	1,5	175	28	6,9
13	0,125	–0,077	0,050	4,8	1,2	55	7	1,8
17	0,163	–0,059	0,106	2,4	0,6	13	1	0,3
19	0,182	–0,053	0,132	1,9	0,5	8	1	0,2
				DF (A) % = 4,4			DF (B) % = 9,3	
$R_T = X_T/Q_T = X_T/8$ (calcul simplifié)						$I_{C\ eff.}$ = 313 A		
						$I_{C/ICN}$ = 1,35		

L'examen du tableau 1, conduit aux conclusions suivantes:

– si une fréquence harmonique est proche de la fréquence de résonance série, une tension relativement faible sur le jeu de barres amont peut engendrer un courant élevé.

Dans l'exemple, pour h = 11, le condensateur est parcouru par un courant de 175 A qui représente environ 75 % de son courant fondamental;

– ce courant élevé produit une chute de tension élevée sur le jeu de barres aval, provoquant une distorsion de la tension sinusoïdale.

Dans l'exemple, pour h = 11, le taux de distorsion de tension est de 6,9 %, bien que la tension ne soit que de 1,5 % sur le jeu de barres amont;

– le courant efficace qui traverse le condensateur est égal à 1,35 fois son courant assigné. Le condensateur est donc en surcharge car la limite normale est de 1,3 fois son courant assigné.

Il est possible de concevoir un condensateur capable de résister à un tel courant, mais cela ne résout pas le problème. En effet, la distorsion de tension sur le jeu de barres aval avoisine 7 % pour une seule fréquence harmonique (h = 11), ce qui est bien supérieur aux niveaux de compatibilité normaux.

De plus, on peut constater que cette amplification est obtenue non seulement lorsque la fréquence coïncide avec la fréquence de résonance, mais aussi lorsque ces deux fréquences sont proches. La fréquence de résonance donnant l'impédance minimale est approximativement:

$$f_{res} = f_1 \sqrt{\left| \frac{X_{C1}}{X_{T1}} \right|}$$

2.4 *Exemple de résonance parallèle*

Dans l'exemple de calcul présenté ci-après, on analyse le montage en parallèle d'un transformateur (inductance X_T et résistance R_T) et d'un condensateur. La figure 4a montre le schéma unifilaire et la figure 4b l'impédance en fonction du rang harmonique. Des résultats typiques des calculs des impédances, des tensions et des courants aux fréquences harmoniques caractéristiques sont donnés dans le tableau 2.

Table 1 – Numerical results of impedances, voltages and currents at characteristic harmonic orders of a series resonance circuit in a network with a distorted supply voltage

h	X_T Ω	X_C Ω	Z Ω	U_A V	U_A(%) %	I_C A	U_B V	U_B(%) %
1	0,010	–1,000	0,990	400,0	100,0	233	404	101,0
5	0,048	–0,200	0,152	12,0	3,0	46	16	3,9
7	0,067	–0,143	0,076	9,6	2,4	73	18	4,5
11	0,106	–0,091	0,020	6,0	1,5	175	28	6,9
13	0,125	–0,077	0,050	4,8	1,2	55	7	1,8
17	0,163	–0,059	0,106	2,4	0,6	13	1	0,3
19	0,182	–0,053	0,132	1,9	0,5	8	1	0,2
				DF (A) % = 4,4			DF (B) % = 9,3	
$R_T = X_T/Q_T = X_T/8$ (simplified)						$I_{C\ eff.}$ = 313 A		
						I_C/I_{CN} = 1,35		

The following can be concluded from table 1:

– a relatively low voltage on the supply-busbar can cause a high current, if the frequency is close to the series resonance frequency.

The example at h = 11 results in a capacitor current of 175 A which is about 75 % of the fundamental capacitor current;

– the high current causes a high voltage drop on the load-busbar, which leads to a distortion of the sinusoidal voltage.

The example at h = 11 results in 6,9 % voltage distortion factor although the voltage was only 1,5 % on the supply-busbar;

– the r.m.s. current through the capacitor is 1,35 times the rated capacitor current. This is an overload condition because the normal limit is 1,3 times the rated capacitor current.

It is possible to design a capacitor which is able to withstand such a current. But this is not a solution to the problem because the voltage distortion on the load-busbar is about 7 % for a single harmonic frequency (h = 11) which is much higher than normal compatibility levels.

Additionally, it can be seen that magnification is not only obtained when the frequency equals the resonance frequency, but also when the frequency is close to the resonance frequency. The resonance frequency where the resulting impedance has a minimum is approximately

$$f_{res} = f_1 \sqrt{\left| \frac{X_{C1}}{X_{T1}} \right|}$$

2.4 *Example of parallel resonance*

In the following calculation example, the parallel connection of a transformer (inductance X_T and resistance R_T) and a capacitance is analyzed. Figure 4a shows the one-line diagram and figure 4b shows the impedance versus harmonic order. Typical numerical results of impedances, voltages and currents at characteristic harmonic frequencies are shown in table 2.

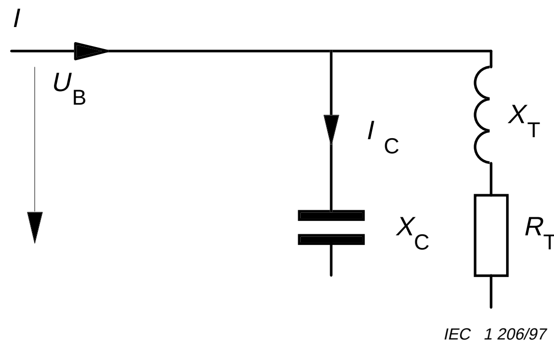


Figure 4a – Schéma unifilaire d'un circuit résonant parallèle

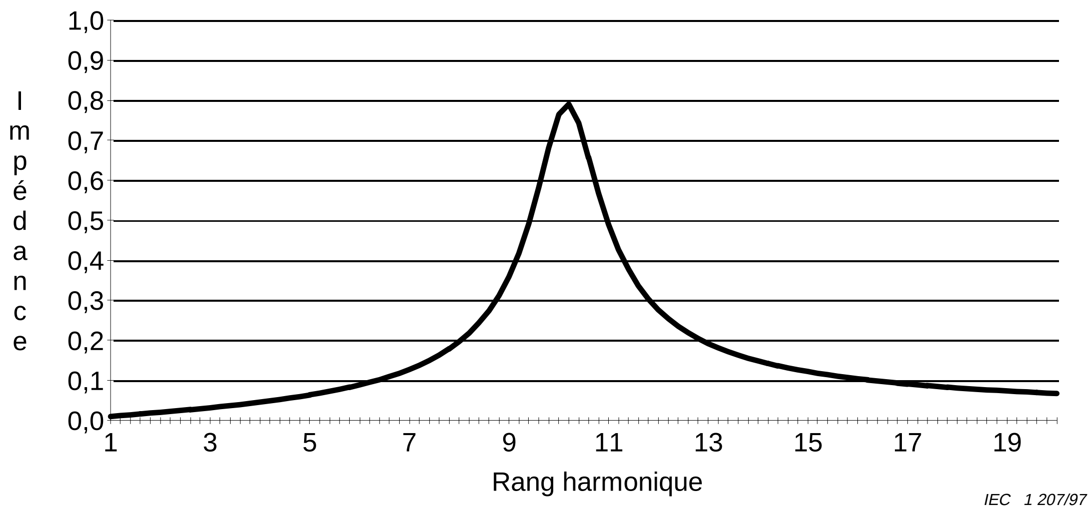


Figure 4b – Impédance en ohms du circuit représenté dans la figure 4a en fonction du rang harmonique

Légende des symboles et valeurs utilisés dans les figures 4a, 4b et dans le tableau 2.

U_N	tension de référence (dans l'exemple: 400 V triphasé)
$h = f_h/f_1$	rang harmonique, fréquence fondamentale f_1, fréquence harmonique f_h
$X_T = X_{T1} \cdot h$	réactance de court-circuit d'un transformateur de 1 000 kVA ayant une tension de court-circuit de 6 %
$Q_T = 8$	facteur de qualité du transformateur
$X_C = X_{C1}/h$	réactance d'un condensateur de 160 kvar
Z	impédance équivalente (voir figure 4a)
I, I (%)	courants sur le jeu de barres aval. Les valeurs sont les valeurs théoriques d'un variateur de 300 kVA
U_B	tension obtenue sur le jeu de barres aval
U_B (%) = $(U_B/U_N) \cdot 100$	
I_C	courant dans le condensateur
I_{CN}	courant assigné du condensateur

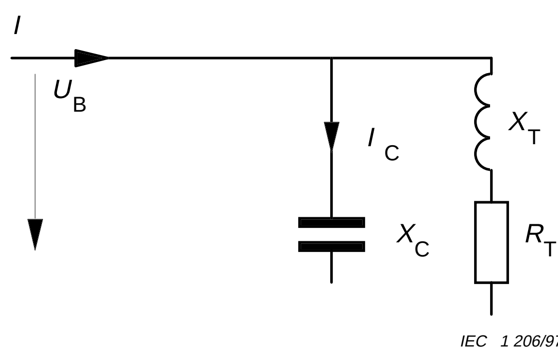


Figure 4a – One-line diagram of a parallel resonance circuit

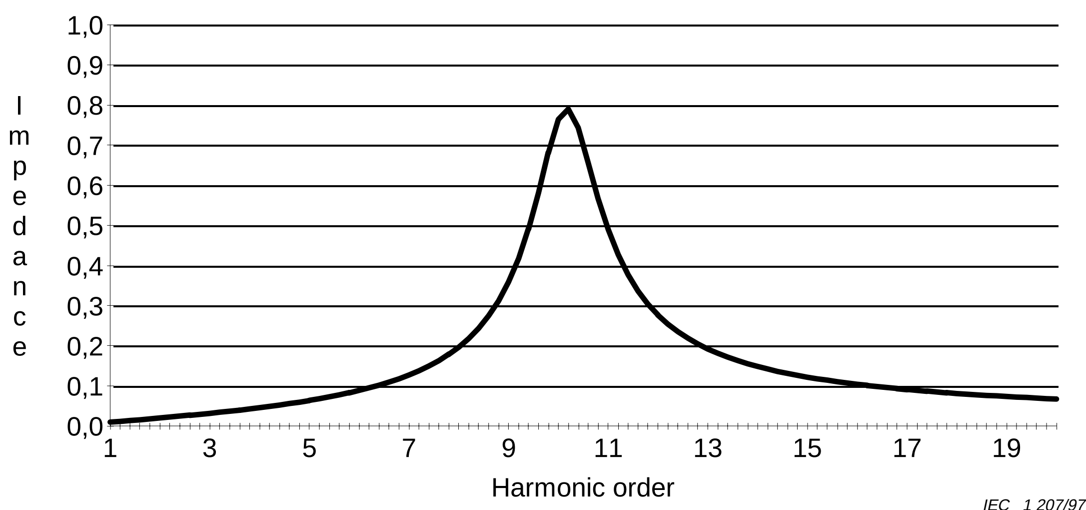


Figure 4b – Impedance in ohms versus harmonic order of the circuit shown in figure 4a

Explanation of the symbols and values used in figures 4a, 4b and table 2.

U_N	reference voltage (example: 3-phase 400 V)
$h = f_h / f_1$	harmonic order, f_1 fundamental frequency, f_h harmonic frequency
$X_T = X_{T1} \cdot h$	short-circuit reactance of a transformer of 1 000 kVA having an impedance voltage of 6 %
$Q_T = 8$	transformer quality-factor
$X_C = X_{C1} / h$	reactance of a capacitor of 160 kvar
Z	equivalent impedance (see figure 4a)
I, $I(\%)$	current on the load-busbar. The values are the theoretical values of a 300 kVA drive
U_B	resulting voltage on the load-busbar
$U_B(\%) = (U_B / U_N) \cdot 100$	
I_C	capacitor current
I_{CN}	rated capacitor current

Tableau 2 – Résultats du calcul des impédances, des tensions et des courants aux rangs harmoniques caractéristiques d'un circuit présentant une résonance parallèle et alimenté par un réseau comportant des harmoniques de courant

h	X_T Ω	X_C Ω	Z Ω	I A	I (%) %	U_B V	U_B (%) %	I_C A
1	0,010	–0,000	0,010	433	100,0	---	---	231
5	0,048	–0,200	0,064	87	20,0	10	2,4	28
7	0,067	–0,143	0,127	62	14,3	14	3,4	55
11	0,106	–0,091	0,490	39	9,1	33	8,3	212
13	0,125	–0,077	0,192	33	7,7	11	2,8	83
17	0,163	–0,059	0,091	25	5,9	4	1,0	39
19	0,182	–0,053	0,073	23	5,3	3	0,7	32
						DF (B) % = 9,8		
$R_T = X_T/Q_T = X_T/8$ (calcul simplifié)								$I_{C\,eff.}$ = 334 A
								I_C/I_{CN} = 1,45

L'examen du tableau 2 conduit aux conclusions suivantes:

– un courant harmonique relativement faible sur le jeu de barres aval peut engendrer un courant élevé au niveau du condensateur, si sa fréquence est proche de la fréquence de résonance parallèle.

Dans l'exemple, pour h = 11, le condensateur est parcouru par un courant de 212 A qui représente plus de 90 % du courant fondamental, bien que le courant harmonique sur le jeu de barres aval ne soit que de 39 A;

– ce courant élevé produit une chute de tension élevée sur le jeu de barres aval, provoquant une distorsion de la tension sinusoïdale.

Dans l'exemple, pour h = 11, le taux de distorsion de tension atteint 8,3 %;

– le courant efficace qui traverse le condensateur est égal à 1,45 fois son courant assigné. Le condensateur est donc en surcharge car la limite normale est de 1,3 fois son courant assigné.

Il est possible de concevoir un condensateur capable de résister à un tel courant, mais cela ne résout pas le problème. En effet la distorsion de tension sur le jeu de barres aval avoisine 8 % pour une seule fréquence harmonique, ce qui est bien supérieur aux niveaux de compatibilité normaux.

De plus, on peut constater que cette amplification est obtenue non seulement lorsque la fréquence coïncide avec la fréquence de résonance mais aussi lorsque ces deux fréquences sont proches. La fréquence de résonance donnant l'impédance minimale est approximativement:

$$f_{res} = f_1 \sqrt{\left|\frac{X_{C1}}{X_{T1}}\right|}$$

NOTE – En fait, l'impédance amont est connectée en série avec l'impédance du transformateur. Dans une certaine mesure, ceci modifie la fréquence de résonance et les amplitudes des tensions et des courants.

Table 2 – Numerical results of impedances, voltages and currents at characteristic harmonic orders of a parallel resonance circuit in the presence of a harmonic current source.

h	X_T Ω	X_C Ω	Z Ω	I A	I (%) %	U_B V	U_B (%) %	I_C A
1	0,010	–,000	0,010	433	100,0	---	---	231
5	0,048	–0,200	0,064	87	20,0	10	2,4	28
7	0,067	–0,143	0,127	62	14,3	14	3,4	55
11	0,106	–0,091	0,490	39	9,1	33	8,3	212
13	0,125	–0,077	0,192	33	7,7	11	2,8	83
17	0,163	–0,059	0,091	25	5,9	4	1,0	39
19	0,182	–0,053	0,073	23	5,3	3	0,7	32
						DF (B) % = 9,8		
$R_T = X_T/Q_T = X_T/8$ (simplified)								$I_{C\ eff.}$ = 334 A
								I_C/I_{CN} = 1,45

The following can be concluded from table 2:

– a relatively low current on the load-busbar can cause a high capacitor current, if the frequency is close to the parallel resonance frequency.

The example at h = 11 results in a capacitor current of 212 A which is more than 90 % of the fundamental capacitor current, although the harmonic current was only 39 A on the load-busbar;

– the high current causes a high voltage drop on the load-busbar, which leads to a distortion of the sinusoidal voltage.

The example at h = 11 results in 8,3 % voltage distortion factor;

– the r.m.s. current through the capacitor is 1,45 times the rated capacitor current. This is an overload condition because the normal limit is 1,3 times the rated capacitor current.

It is possible to design a capacitor which is able to withstand such a current. But this is not a solution to the problem because the voltage distortion on the load-busbar is about 8 % for a single harmonic frequency which is much higher than normal compatibility levels.

Additionally, it can be seen that magnification is not only obtained when the frequency equals the resonance frequency, but also when the frequency is close to the resonance frequency. The resonance frequency where the resulting impedance has a maximum is approximately:

$$f_{res} = f_1 \sqrt{\left|\frac{X_{C1}}{X_{T1}}\right|}$$

NOTE – In practice, the network impedance is connected in series to the transformer impedance. This will affect the resonance frequency and the voltage and current amplitudes to a certain extent.

2.5 *Solutions pour éviter les résonances*

La méthode principale pour éviter les problèmes de résonance est de maintenir la fréquence de résonance aussi éloignée que possible des fréquences harmoniques ayant les amplitudes les plus fortes.

Ceci peut être obtenu en changeant l'inductance ou la capacité des composants du réseau. Cependant, la latitude est faible si la configuration particulière de l'installation est définie par l'alimentation et par la compensation d'énergie réactive. En particulier, avec une batterie automatique de condensateurs, de nombreuses résonances doivent être prises en compte.

La solution la plus courante pour éviter ces problèmes de résonance est de raccorder une inductance en série avec le condensateur, accordée à une fréquence de résonance série inférieure à la fréquence la plus basse des tensions et des courants harmoniques présents sur le réseau. Au-dessous de la fréquence d'accord, l'impédance du circuit inductance-condensateur est capacitive, et inductive au-dessus de la fréquence d'accord. L'interaction de l'inductance du réseau et de l'impédance (inductive) du circuit inductance-condensateur ne peut plus créer de résonance, ni parallèle ni série, aux fréquences des courants et tensions présents sur le réseau. L'inductance peut être définie par son impédance relative:

$$p = \left| \frac{X_{L1}}{X_{C1}} \right|$$

Le rang d'accord est égal à:

$$\frac{f_{LC}}{f_1} = \sqrt{\frac{1}{p}}$$

Dans la plupart des réseaux, l'harmonique 5 correspond au rang le plus bas ayant une amplitude importante. Pour ces réseaux, il est utile de choisir un circuit inductance-capacité ayant une fréquence d'accord inférieure à $5 \cdot f_1$, soit $p > 4$ %.

Si le réseau comporte de fortes tensions de rang 3 entre phases, comme cela se produit par exemple avec des ponts redresseurs monophasés ou des transformateurs saturés, la fréquence d'accord doit être inférieure à $3 \cdot f_1$, soit $p > 11$ %.

Dans les exemples suivants des figures 5a, 5b, 6a, 6b et dans les tableaux 3 et 4, on a repris les mêmes valeurs que précédemment mais avec un circuit inductance-capacité accordé sur le rang $3{,}78 \cdot f_1$, soit $p = 7$ %, en gardant la même puissance réactive que précédemment.

2.5 *Solutions to avoid resonances*

The principal method used to avoid resonance problems is to keep the resonance frequency as far away as possible from the harmonic frequencies which have considerable amplitudes.

This can be done by changing the inductance or the capacitance of the network components. However, there is little latitude, if a particular network configuration is defined by the power supply and reactive power compensation. In particular when an automatic capacitor bank is to be used, many resonance conditions have to be considered.

The most common solution to avoid resonance problems is to connect a reactor in series with the capacitor, tuned to a series resonance frequency which is below the lowest frequency of the harmonic voltages and currents in the network. Below the tuning frequency, the impedance of the capacitor-reactor-connection is capacitive, above the tuning frequency, it is inductive. The interaction of the network inductance and the (inductive) impedance of the capacitor-reactor-connection can no longer create a resonance condition, neither a series or a parallel resonance, at the frequencies of the harmonic voltages and currents in the network. The reactor may be specified by its relative impedance:

$$p = \left| \frac{X_{L1}}{X_{C1}} \right|$$

The tuning order is:

$$\frac{f_{LC}}{f_1} = \sqrt{\frac{1}{p}}$$

In most networks, the 5th harmonic is the lowest frequency with a considerable amplitude. For such networks, it is useful to choose a capacitor-reactor-connection with a tuning frequency below $5 \cdot f_1$, i.e. $p > 4$ %.

If the network is loaded with strong 3rd harmonic voltages between phases as occurs for example with single phase rectifiers and overexcited transformers, the tuning frequency shall be below $3 \cdot f_1$, i.e. $p > 11$ %.

In the following examples of figures 5a, 5b, 6a, 6b and tables 3 and 4 the same values are used as before, but with a capacitor-reactor-connection tuned to $3,78 \cdot f_1$ with a $p = 7$ % reactor and compensation power at power frequency as before.

2.5.1 *Raccordement condensateur-inductance: résonance série*

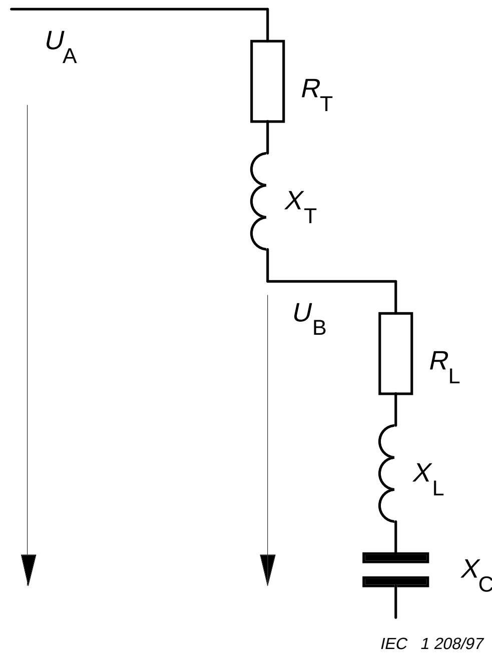


Figure 5a – Schéma unifilaire d'un circuit résonant série comportant un condensateur et une inductance

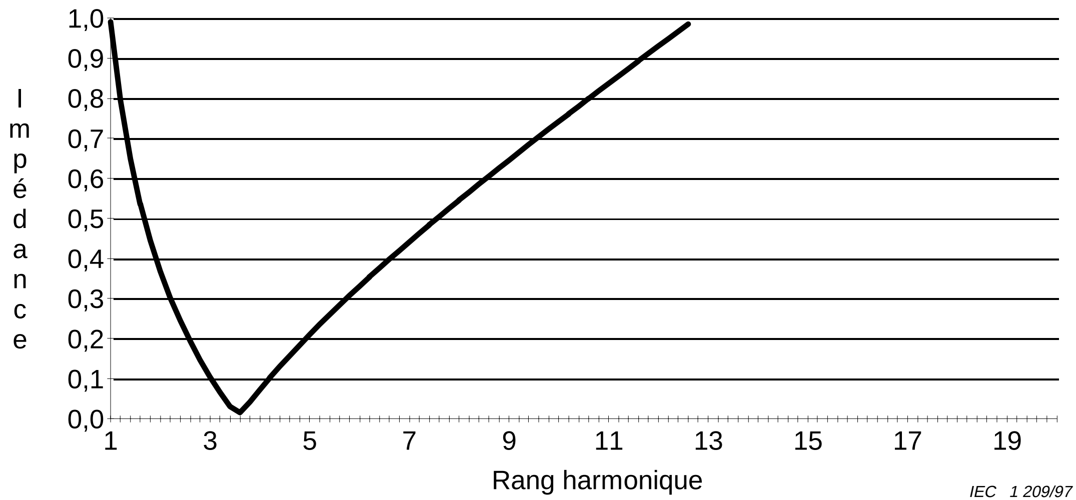


Figure 5b – Impédance en ohms du circuit représenté dans la figure 5a en fonction du rang harmonique *h*

Légende des symboles et valeurs utilisés dans les figures 5a, 5b et dans le tableau 3.

U_N	tension de référence (dans l'exemple: 400 V triphasé)
$h = f_h/f_1$	rang harmonique, fréquence fondamentale f_1, fréquence harmonique f_h
$X_T = X_{T1} \cdot h$	réactance de court-circuit d'un transformateur de 1 000 kVA ayant une tension de court-circuit de 6 %

2.5.1 *Capacitor-reactor connection: series resonance*

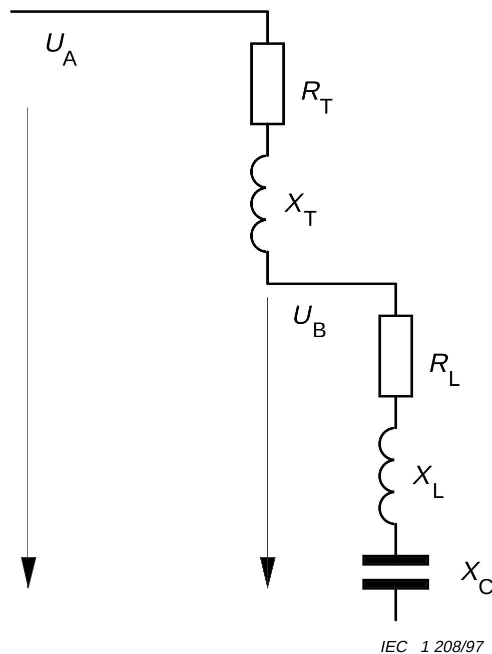


Figure 5a – One-line diagram of a series resonance circuit with capacitor-reactor connection

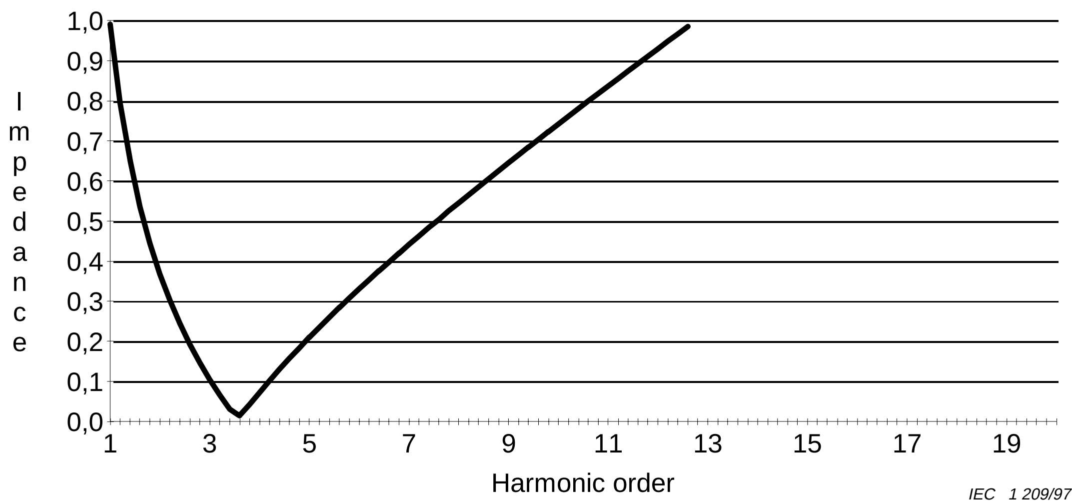


Figure 5b – Impedance in ohms versus harmonic order *h* of the circuit shown in figure 5a

Explanation of the symbols and values used in figures 5a, 5b and table 3.

U_N	reference voltage (example: 3-phase 400 V)
$h = f_h / f_1$	harmonic order, f_1 fundamental frequency, f_h harmonic frequency
$X_T = X_{T1} \cdot h$	short-circuit reactance of a transformer of 1 000 kVA having an impedance voltage of 6 %

$Q_T = 8$ facteur de qualité du transformateur

$X_L + X_C$ réactance d'un condensateur muni d'une inductance $p = 7$ %, la batterie débitant 160 kvar

$Q_L = 30$ facteur de qualité de l'inductance

Z impédance équivalente (voir figure 5a)

U_A tension sur le jeu de barres amont. Les valeurs majorées de 60 % proviennent d'un rapport CIGRE sur les harmoniques [8]

U_A (%) = $(U_A/U_N) \cdot 100$

I_C courant dans le condensateur

I_{CN} courant assigné du condensateur

U_B tension obtenue sur le jeu de barres aval

U_B (%) = $(U_B/U_N) \cdot 100$

Tableau 3 – Résultats du calcul des impédances, des tensions et des courants aux rangs harmoniques caractéristiques d'un circuit résonant série et alimenté par un réseau comportant des harmoniques de tension

h	X_T Ω	$X_C + X_L$ Ω	Z Ω	U_A V	U_A (%) %	I_C A	U_B V	U_B (%) %
1	0,010	–1,000	0,990	400,0	100,0	233	404	101,0
5	0,048	0,161	0,212	12,0	3,0	33	9	2,3
7	0,067	0,373	0,443	9,6	2,4	13	8	2,0
11	0,106	0,730	0,840	6,0	1,5	4	5	1,3
13	0,125	0,896	1,026	4,8	1,2	3	4	1,0
17	0,163	1,216	1,386	2,4	0,6	1	2	0,5
19	0,182	1,374	1,563	1,9	0,5	1	2	0,4
				DF (A) % = 4,4			DF (B) % = 3,5	
$R_T = X_T/Q_T = X_T/8$ (calcul simplifié)						$I_{C\ eff.}$ = 236 A		
$R_L = X_L/Q_L = X_L/30$ (calcul simplifié)						I_C/I_{CN} = 1,02		

L'examen du tableau 3 conduit aux conclusions suivantes:

– l'adjonction d'une inductance série permet d'éviter tout problème de résonance entraînant une amplification des tensions et des courants harmoniques;

– le taux de distorsion en tension sur le jeu de barres aval est de 3,5 % au lieu de 9,3 % dans l'exemple donné dans le tableau 1. La qualité de la tension réseau est donc améliorée de ce point de vue.

$Q_T = 8$ transformer quality factor

$X_L + X_C$ reactance of a capacitor with a $p = 7\ \%$ reactor for 160 kvar compensation power

$Q_L = 30$ reactor quality factor

Z equivalent impedance (see figure 5a)

U_A voltage on the supply-busbar. The values are taken from a CIGRE report about harmonics and multiplied by 60 % [8]

$U_A(\%) = (U_A / U_N) \cdot 100$

I_C capacitor current

I_{CN} rated capacitor current

U_B resulting voltage on the load-busbar

$U_B(\%) = (U_B / U_N) \cdot 100$

Table 3 – Numerical results of impedances, voltages and currents at characteristic harmonic orders of a series resonance circuit with a capacitor-reactor-connection in a network with distorted supply voltage

h	X_T Ω	$X_C + X_L$ Ω	Z Ω	U_A V	U_A (%) %	I_C A	U_B V	U_B (%) %
1	0,010	–1,000	0,990	400,0	100,0	233	404	101,0
5	0,048	0,161	0,212	12,0	3,0	33	9	2,3
7	0,067	0,373	0,443	9,6	2,4	13	8	2,0
11	0,106	0,730	0,840	6,0	1,5	4	5	1,3
13	0,125	0,896	1,026	4,8	1,2	3	4	1,0
17	0,163	1,216	1,386	2,4	0,6	1	2	0,5
19	0,182	1,374	1,563	1,9	0,5	1	2	0,4
				DF (A) % = 4,4			DF (B) % = 3,5	
$R_T = X_T/Q_T = X_T/8$ (simplified)						$I_{C\ eff.} = 236$ A		
$R_L = X_L/Q_L = X_L/30$ (simplified)						$I_C/I_{CN} = 1,02$		

The following can be concluded from table 3:

– a resonance-problem with an amplification of voltages and currents is avoided with the capacitor-reactor connection;

– the voltage distortion factor on the load-busbar is 3,5 % while that in the example of table 1 is 9,3 %. The power quality is improved in this respect.

2.5.2 *Raccordement condensateur – inductance: résonance parallèle*

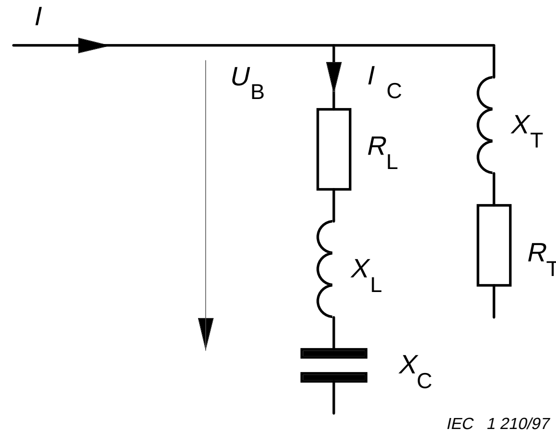


Figure 6a – Schéma unifilaire d'un circuit résonant parallèle comportant un condensateur et une inductance

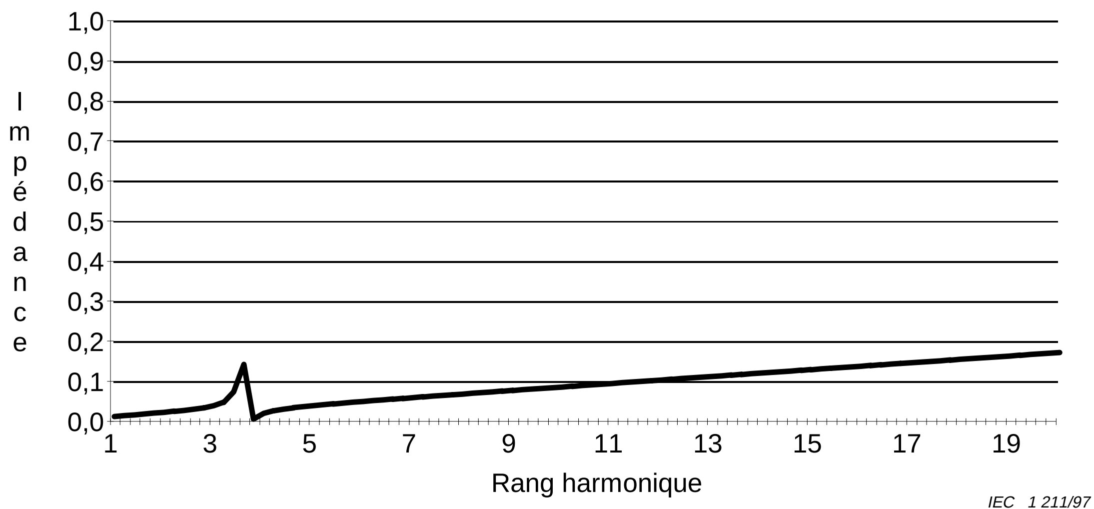


Figure 6b – Impédance en ohms du circuit représenté dans la figure 6a en fonction du rang harmonique

Légende des symboles et valeurs utilisés dans les figures 6a, 6b et dans le tableau 4.

U_N	tension de référence (dans l'exemple: 400 V triphasé)
$h = f_h/f_1$	rang harmonique, fréquence fondamentale f_1, fréquence harmonique f_h
$X_T = X_{T1} \cdot h$	réactance de court-circuit d'un transformateur de 1 000 kVA ayant une tension de court-circuit de 6 %
$Q_T = 8$	facteur de qualité du transformateur
$X_L + X_C$	réactance d'un condensateur muni d'une inductance p = 7 %, la batterie débitant 160 kvar
$Q_L = 30$	facteur de qualité de l'inductance
Z	impédance équivalente (voir figure 6a)

2.5.2 *Capacitor-reactor connection: parallel resonance*

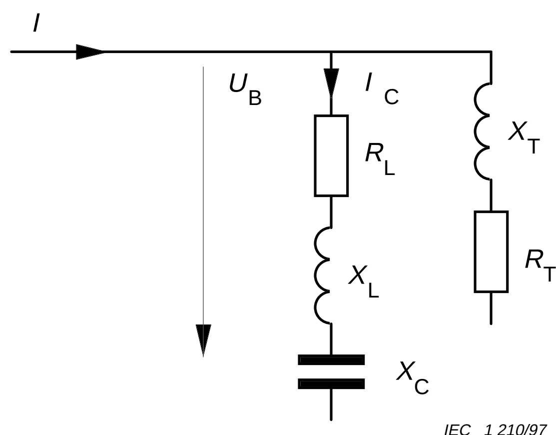


Figure 6a – One-line diagram of a parallel resonance circuit with capacitor-reactor connection

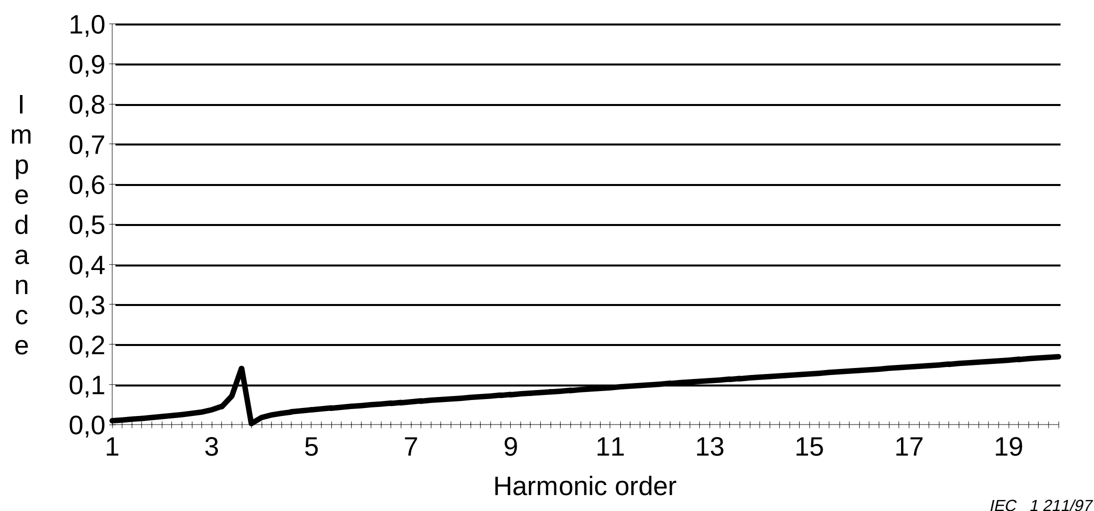


Figure 6b – Impedance in ohms versus harmonic order of the circuit shown in figure 6a

Explanation of the symbols and values used in figures 6a, 6b and table 4.

U_N	reference voltage (example: 3-phase 400 V)
$h = f_h / f_1$	harmonic order, f_1 fundamental frequency, f_h harmonic frequency
$X_T = X_{T1} \cdot h$	short-circuit reactance of a transformer of 1 000 kVA having an impedance voltage of 6 %
$Q_T = 8$	transformer quality-factor
$X_L + X_C$	reactance of a capacitor with a p = 7 % reactor for 160 kvar compensation power
$Q_L = 30$	reactor quality-factor
Z	equivalent impedance (see figure 6a)

I, I(%) courants sur le jeu de barres aval. Les valeurs sont les valeurs théoriques d'un variateur de 300 kVA.

U_B tension obtenue sur le jeu de barres aval

U_B (%) = $(U_B/U_N) \cdot 100$

I_C courant dans le condensateur

I_{CN} courant assigné du condensateur

Tableau 4 – Résultats du calcul des impédances, des tensions et des courants aux rangs harmoniques caractéristiques d'un circuit résonant parallèle et alimenté par un réseau comportant des harmoniques de courant

h	X_T Ω	$X_L + X_C$ Ω	Z Ω	I A	I (%) %	U_B V	U_B(%) %	I_C A
1	0,010	–1,000	0,010	433	100,0	---	---	231
5	0,048	0,161	0,037	87	20,0	6	1,4	20
7	0,067	0,373	0,057	62	14,3	6	1,5	10
11	0,106	0,730	0,093	39	9,1	6	1,6	5
13	0,125	0,896	0,110	33	7,7	6	1,6	4
17	0,163	1,216	0,145	25	5,9	6	1,6	3
19	0,182	1,374	0,162	23	5,3	6	1,6	3
						DF (B)% = 3,8		
$R_T = X_T/Q_T = X_T/8$ (calcul simplifié)								$I_{C\ eff.}$ = 232 A
$R_L = X_L/Q_L = X_T/30$ (calcul simplifié)								I_C/I_{CN} = 1,01

L'examen du tableau 4 conduit aux conclusions suivantes:

– l'adjonction d'une inductance série permet d'éviter tout problème de résonance entraînant une amplification des tensions et des courants harmoniques;

– le taux de distorsion en tension sur le jeu de barres aval est de 3,8 % au lieu de 9,8 % dans l'exemple donné dans le tableau 2. La qualité de la tension du réseau est donc améliorée de ce point de vue.

NOTE – En fait, l'impédance du réseau amont est connectée en série avec l'impédance du transformateur. Dans une certaine mesure, ceci modifie la fréquence de résonance et les amplitudes des tensions et des courants harmoniques.

3 Condensateurs shunt et filtres pour les réseaux de tension inférieure ou égale à 1 000 V

3.1 *Introduction*

On décrit ci-après trois façons d'utiliser les condensateurs shunt sur les réseaux à basse tension, accompagnées d'indications sur les précautions à prendre dans chaque cas.

Dans la conception d'un équipement de compensation, il convient de prendre en considération toutes les configurations du réseau, y compris les fonctionnements exceptionnels et les régimes de secours, ainsi que d'éventuelles extensions futures.

I, I(%) current on the load-busbar. The values are the theoretical values of a 300 kVA drive.

U_B resulting voltage on the load-busbar

$U_B(\%) = (U_B / U_N) \cdot 100$

I_C capacitor current

I_{CN} rated capacitor current

Table 4 – Numerical results of impedances, voltages and currents at characteristic harmonic orders of a parallel resonance circuit with a capacitor-reactor connection in the presence of a harmonic current source

h	X_T Ω	$X_L + X_C$ Ω	Z Ω	I A	I (%) %	U_B V	U_B(%) %	I_C A
1	0,010	–1,000	0,010	433	100,0	–	–	231
5	0,048	0,161	0,037	87	20,0	6	1,4	20
7	0,067	0,373	0,057	62	14,3	6	1,5	10
11	0,106	0,730	0,093	39	9,1	6	1,6	5
13	0,125	0,896	0,110	33	7,7	6	1,6	4
17	0,163	1,216	0,145	25	5,9	6	1,6	3
19	0,182	1,374	0,162	23	5,3	6	1,6	3
						DF (B)% = 3,8		
$R_T = X_T/Q_T = X_T/8$ (simplified)								$I_{C\ eff.}$ = 232 A
$R_L = X_L/Q_L = X_L/30$ (simplified)								I_C/I_{CN} = 1,01

The following can be concluded from table 4:

– a resonance problem with an amplification of voltages and currents is avoided with the capacitor-reactor connection;

– the voltage distortion factor on the load-busbar is 3,8 % while that in the example of table 2 is 9,8 %. The power quality is improved in this respect.

NOTE – In practice, the network impedance is connected in series to the transformer impedance. This will affect the resonance frequency and the voltage and current amplitudes to a certain extent.

3 Shunt capacitors and filters for networks having a voltage up to and including 1 000 V

3.1 *Introduction*

Three methods of utilising shunt capacitors on the low voltage network are described below together with an indication of the precautions to be taken in each case.

To design a power factor correction installation, all network configurations including exceptional and emergency arrangements as well as possible future extensions should be considered.

3.2 *Condensateurs shunt*

Ce mode de compensation peut être utilisé lorsqu'il n'est pas nécessaire de prendre des dispositions particulières pour éviter les problèmes de résonance ou pour réduire les harmoniques. C'est généralement le cas lorsque la fréquence de résonance déterminée par l'inductance du réseau et la capacité de l'équipement de compensation est relativement élevée, et que le contenu harmonique de l'installation est très faible (tensions harmoniques du réseau et courants harmoniques résultant des charges).

Il convient d'avoir présent à l'esprit que le risque d'avoir des problèmes de résonance est déterminé par la capacité totale de toutes les installations de compensation raccordées au côté basse tension du transformateur d'alimentation. Si ce problème est mis en évidence après la mise en service de l'équipement de compensation, la remise en ordre de cet équipement est généralement plus coûteuse et difficile qu'à l'origine car il est souvent impossible de réutiliser les condensateurs, châssis, etc. existants.

3.3 *Condensateurs avec inductance anti-harmonique*

Comme indiqué en 2.5, on peut éviter les problèmes de résonance harmonique, tant d'un point de vue technique qu'économique, en raccordant une inductance en série sur chaque phase de chaque gradin de l'équipement de compensation.

Ce mode de compensation présente aussi l'avantage de réduire les tensions harmoniques présentes dans le réseau en absorbant partiellement les courants harmoniques de rang supérieur au rang d'accord du circuit inductance-capacité.

Le choix de la fréquence d'accord du circuit inductance-capacité dépend des amplitudes et des fréquences des courants harmoniques qui circulent dans l'installation, et de la fréquence de l'éventuel signal de télécommande centralisée (voir 3.6).

Typiquement, on ne peut adjoindre une inductance en série avec des condensateurs déjà installés pour constituer un filtre non accordé, car ces condensateurs peuvent ne pas être dimensionnés pour les contraintes supplémentaires de tension et/ou de courant résultant de cette adjonction.

Normalement, on ne doit pas associer un équipement de compensation comportant une inductance série à un équipement qui n'en possède pas. Il convient d'observer la même prudence lorsqu'un ensemble condensateur shunt avec inductance anti-harmonique est adjoint à un autre ensemble accordé sur une fréquence d'accord différente. Dans les deux cas, certains problèmes peuvent apparaître, dus à une répartition inégale de la charge harmonique et à une éventuelle surcharge d'un des filtres ou d'une partie de l'un d'eux.

3.4 *Filtre accordé*

Pour maintenir les tensions harmoniques du réseau à un niveau acceptable, on peut utiliser des filtres accordés comme mentionné en 1.4.1. Les filtres agissent comme une charge vis-à-vis du générateur d'harmonique, absorbant les courants harmoniques et réduisant ainsi l'accroissement des tensions harmoniques. Lorsque l'on définit les prescriptions pour un filtre accordé, il est important de prendre en compte le réseau complet.

Pour concevoir un filtre accordé, il faut connaître les valeurs d'impédance harmonique du réseau, en particulier l'impédance du transformateur de distribution, ainsi que le spectre de fréquence de la ou des sources harmoniques et les tensions harmoniques présentes sur le réseau à haute tension.

Un filtre accordé comprend un ou plusieurs filtres unitaires (montage en série d'une inductance et d'un condensateur sur chaque phase), chacun étant accordé de façon à présenter, à la fréquence harmonique considérée, une impédance relativement faible par rapport à celle du réseau, à cette même fréquence. Les courants harmoniques sont ainsi en grande partie absorbés par ce filtre. A la fréquence du réseau, le filtre se comporte comme un condensateur, corrigeant le facteur de puissance.

3.2 *Shunt capacitors*

This type of power factor correction installation can be used when it is not necessary to take measures to avoid resonance problems or to reduce harmonics. This is generally the case when the resonant frequency given by the network inductance and the capacitance of the power factor correction installation is relatively high and the harmonic content of the network (i.e. bus voltage and harmonic currents generated by the loads) is very low.

It should however be understood that the total resulting capacitance of all power factor correction installations connected to the low voltage side of one distribution transformer determines the possibility of a harmonic resonance problem. Avoiding such problems when the power factor correction installation is already in service can be more difficult and costly than at the original installation time as it is often not possible to re-use existing capacitors, frames, etc.

3.3 *Detuned filter*

As shown in 2.5, an effective way to prevent harmonic resonance problems from a technical as well as an economical point of view is to connect a reactor in series with each phase of each capacitor step of the power factor correction installation.

This type of power factor correction installation (detuned filter) also gives the advantage of reducing the harmonic voltages in the network by absorbing part of the harmonic currents with an order higher than the tuning frequency of the reactor-capacitor arrangement.

The choice of the tuning frequency of the reactor-capacitor arrangement depends on the magnitudes and frequencies of the harmonic currents circulated in the network, and on the signal frequency of a ripple control installation if any (see 3.6).

Typically, reactors cannot be added to existing capacitors to make a detuned filter as the installed capacitors may not be rated for the additional voltage and/or current caused by the added series reactor.

Normally, a power factor correction installation having series reactors shall not be mixed with an equipment without series reactor. Care should also be taken when a detuned filter is extended by equipment having a different tuning frequency. In both cases problems can occur due to unequal sharing of the harmonic load and possible overloading of one filter or part of it.

3.4 *Tuned filter*

To keep the harmonic voltages in the network to an acceptable level, a tuned filter may have to be considered as mentioned in 1.4.1. The filters act as a load on the harmonic generator absorbing the harmonic currents and thus reducing the harmonic voltage increases. When assessing the requirements of the tuned filter it is important to consider the complete network system.

To design a tuned filter it is necessary to know the harmonic impedance values of the network, especially the impedance of the distribution transformer as well as the frequency spectrum of the harmonic source(s) and the harmonic voltages in the high voltage network.

A tuned filter comprises one or more tuned filter units (series connection of reactor and capacitor on each phase) each tuned to give a relatively low impedance at the considered harmonic frequency compared to the impedance of the network at the same frequency. Harmonic currents are thus mainly absorbed by this filter. At the network frequency the filter acts as a capacitor providing power factor correction.

En général, il faut concevoir les filtres pour les rangs harmoniques impairs, les multiples de trois étant exclus, soit dans l'ordre croissant: 5, 7, 11, 13, 17, 19, etc. Habituellement, dans les installations à basse tension, il n'est pas nécessaire de prendre en compte l'harmonique de rang trois étant donné qu'il n'apparaît qu'entre phase et neutre et que la plupart des équipements de compensation sont raccordés entre phases (pas de raccordement au neutre). Toutefois, un filtre de rang trois peut être envisagé en cas de déséquilibre de la charge.

Normalement, les règles suivantes sont applicables:

– la puissance réactive de chaque filtre à la fréquence du réseau décroît à mesure que le rang harmonique augmente;

– tous les filtres accordés d'un ensemble sont mis simultanément sous tension. S'il s'avère toutefois nécessaire d'effectuer une mise sous tension individuelle de ces filtres, il convient de l'exécuter dans l'ordre croissant des rangs (5, 7, 11, etc.), et d'effectuer la mise hors tension dans l'ordre inverse;

– en général, on choisit comme fréquence d'accord assignée à un filtre, une fréquence légèrement inférieure à la fréquence harmonique. Ainsi, à cette fréquence, l'impédance du filtre accordé est inductive.

Afin d'éviter tout problème, il convient de prendre des précautions lorsque des filtres accordés doivent être associés à des équipements raccordés à l'enroulement basse tension d'un même transformateur. Des filtres unitaires de même rang harmonique montés en parallèle peuvent ne pas avoir exactement la même fréquence d'accord, du fait des tolérances des composants. Cela peut provoquer des problèmes dus par exemple à une répartition inégale de la charge harmonique et/ou à des résonances parallèles entre les filtres accordés. Dans ce cas, on peut utiliser des contacts supplémentaires permettant de relier les points entre les inductances et les condensateurs de chaque phase des filtres unitaires de même rang qui sont en service.

3.5 *Choix des composants*

Un équipement de compensation basse tension est en général prévu pour un montage à l'intérieur et comprend normalement tout ou partie des composants suivants:

– condensateurs;

– inductances (par exemple en cas de filtrage);

– contacteurs et/ou disjoncteurs;

– protection contre les courts-circuits (fusibles ou disjoncteur).

Pour dimensionner ces composants, on se base généralement sur les contraintes calculées dans les conditions de service les plus dures. Dans la conception d'un équipement de compensation et/ou de filtrage, il faut prendre en compte les courants harmoniques produits par les charges ainsi que tout courant ou tension harmonique venant du réseau.

Il convient de s'assurer que les tolérances de fabrication, l'influence de la température et du vieillissement, le fonctionnement des éventuels fusibles internes ou externes, l'éventuelle non-linéarité des composants des filtres, ainsi que la variation de la fréquence du réseau n'auront pas de répercussions inacceptables sur le fonctionnement de l'ensemble de filtrage.

3.5.1 *Condensateurs*

Les condensateurs unitaires ou les batteries de condensateurs représentent la partie essentielle de l'équipement de compensation et/ou de filtrage. Par conséquent, il convient d'effectuer une étude minutieuse afin de parvenir à une conception optimale du condensateur.

Le courant du condensateur comprend une composante fondamentale et des composantes harmoniques. Etant donné que l'amplitude des harmoniques peut être très élevée, particulièrement dans un filtre accordé, il est nécessaire d'en tenir compte dans la définition des valeurs assignées des condensateurs.

Pour le filtre, il convient de tenir compte de l'élévation de tension sur le condensateur due à l'inductance série.

Generally, tuned filter units need to be designed for the odd harmonic orders except multiples of 3, i.e. 5, 7, 11, 13, 17, 19, etc. in increasing order. Usually, in low voltage installations the third harmonic needs not be considered as it only appears between phase and neutral and most of the power factor correction installations are connected between phases (no connection to the neutral). However, in the case of unbalanced load, a third harmonic filter unit may be considered.

Normally, the following are valid:

– the reactive power rating at network frequency of each tuned filter unit decreases with increasing harmonic order;

– all tuned filter units of a filter are switched together. If, however, it is necessary to switch the tuned filter units independently, they should be switched on in ascending order 5, 7, 11, etc. and switched off in the reverse order;

– the rated tuning frequency of a filter unit is generally chosen slightly lower than the harmonic frequency. Thus, the impedance of the tuned filter unit is inductive at the harmonic frequency.

Care should be taken to fit tuned filters to individual items of equipment connected to the low voltage side of the same distribution transformer in order to avoid problems. Parallel connected filter units for one harmonic order will not have exactly the same resonance frequency due to the tolerances of the components causing problems, for example, due to unequal sharing of the harmonic load and/or to parallel resonances between tuned filters. In such cases it could be useful to use additional contacts to connect together the points between reactors and capacitors of each phase of the filter units for the same harmonic order which are in service.

3.5 *Components selection*

A low voltage power factor correction installation is usually installed indoors and normally consists of some or all of the following components:

– capacitors;

– reactors (for example in case of filters);

– contactors and/or circuit-breakers;

– short-circuit protection (fuses or circuit-breaker).

The determination of ratings for these components is usually based on the calculated stresses during worst service conditions. Harmonic currents generated by the electrical loads and any harmonic current or voltage existing on the network have to be considered when designing power factor correction installation and/or filter.

It should be checked that the manufacturing tolerances, the influence of temperature and ageing, the operation of internal or external fuses if any, the possible non-linearity of the filter components as well as the variation of the network frequency will not cause unacceptable repercussions on the function of the filter.

3.5.1 *Capacitors*

The capacitor units or bank are the fundamental part in each power factor correction installation and/or filter. A thorough study should therefore be performed in order to obtain optimal capacitor design.

The capacitor current consists of fundamental and harmonic frequency components. As the magnitude of harmonic components may be very high, especially in a tuned filter, it is necessary to take them into account when defining rated values of the capacitors.

For filters the voltage increase on the capacitor caused by the series connection of the reactor should be considered.

3.5.2 *Inductances*

Le courant de l'inductance comprend une composante fondamentale et des composantes harmoniques. Etant donné que l'amplitude des harmoniques peut être très élevée, particulièrement dans un filtre accordé, il est nécessaire d'en tenir compte dans la définition des valeurs assignées des inductances.

L'inductance doit être conçue pour supporter les échauffements dus à la valeur maximale des courants fondamentaux et harmoniques.

La tolérance de fabrication de l'inductance dépend de la conception du filtre. Une tolérance de fabrication ±3 % est généralement acceptable pour la plupart des applications.

L'inductance doit être capable de supporter le courant de court-circuit apparaissant en cas de défaut, ainsi que les courants et tensions de manoeuvre.

La valeur de l'inductance ne doit pas varier de plus de 5 % entre sa valeur pour le courant assigné et la valeur qu'elle prend aux charges les plus élevées données par les valeurs de crête du courant ou de la tension (niveau d'induction dû à la somme arithmétique des valeurs maximales des courants ou tensions fondamentaux et harmoniques).

Quand on utilise des inductances avec noyau de fer (cas habituel avec les filtres basse tension), il convient de prendre des précautions pour éviter les problèmes de saturation (variation importante de la valeur de l'inductance, ferro-résonance survenant lors de la mise sous tension conduisant à des surcharges des composants, etc.).

Il convient de tenir compte des pertes des inductances.

3.5.3 *Contacteurs et/ou disjoncteurs*

La commutation des équipements de compensation requiert des caractéristiques particulières pour l'appareil de manoeuvre. Par conséquent, on doit tenir compte des règles suivantes:

- le contacteur et le disjoncteur doivent être adaptés à la manoeuvre des condensateurs et ne pas réamorcer;
- la tension assignée du contacteur et du disjoncteur doit être égale ou supérieure à la tension maximale du réseau lorsque l'équipement de compensation et/ou de filtrage est en service;
- le contacteur et le disjoncteur doivent être dimensionnés pour le courant permanent (y compris les harmoniques) susceptible de traverser l'équipement de compensation et/ou de filtrage à la tension maximale, à la fréquence maximale et aux tolérances extrêmes des composants, en particulier l'inductance et le condensateur;
- le pouvoir de coupure du disjoncteur doit être égal ou supérieur au courant de court-circuit qui peut apparaître au niveau de l'équipement de compensation et/ou de filtrage;
- le contacteur et le disjoncteur doivent avoir une tenue de courte durée suffisante pour résister à la fois aux courts-circuits et aux courants d'appel survenant à la mise sous tension;
- le type de contacteur et de disjoncteur doit être choisi en fonction de la fréquence prévisible des manoeuvres.

3.5.4 *Protection contre les courts-circuits (fusibles)*

La tension assignée de la protection contre les courts-circuits doit être égale ou supérieure à la tension maximale du réseau, l'équipement de compensation et/ou de filtrage étant en service.

La protection contre les courts-circuits doit être dimensionnée pour un courant permanent (incluant les harmoniques) susceptible de traverser l'équipement de compensation et/ou de filtrage, à la tension maximale, à la fréquence maximale et aux tolérances extrêmes des composants, en particulier l'inductance et le condensateur.

3.5.2 *Reactors*

The reactor current consists of fundamental and harmonic frequency components. As the magnitude of harmonic components may be very high, especially in a tuned filter, it is necessary to take them into account when defining rated values of the reactors.

The reactor shall be designed for the thermal load due to the maximum fundamental and harmonic currents.

Manufacturing tolerance for the inductance of the reactor is to be taken into account in filter design. A value of ±3 % is acceptable for most filter applications.

The reactor shall be able to withstand the short-circuit current which can occur during fault conditions as well as the switching current and voltage.

The inductance value of the reactor shall not vary by more than 5 % from rated current to the highest loading given by the peak value of the current or voltage (induction caused by the arithmetic sum of the maximum fundamental and harmonic currents or voltages).

When using reactors with an iron core (which is the normal case in low voltage filters), care should be taken to avoid saturation problems (important change of inductance value, ferro-resonance occurring during switching operations and leading to overloading of components, etc).

The losses of the reactors should be considered.

3.5.3 *Contactors and/or circuit-breakers*

The switching of power factor correction installations requires some special features of the switching device. The following aspects shall be therefore considered:

– the contactor and circuit-breaker shall be restrike-free and adapted for capacitors;

– the rated voltage of the contactor and circuit-breaker shall be equal to or higher than the maximum network voltage with the power factor correction installation and/or filter in service;

– the contactor and circuit-breaker shall be designed for continuous current (including harmonics) which can pass the power factor correction installation and/or filter at maximum source voltage, maximum frequency and extreme tolerances of the components, especially capacitor and reactor;

– the interrupting rating of circuit-breaker shall be equal to or greater than the short-circuit current which can occur on the power factor correction installation and/or filter side;

– the contactor and circuit-breaker shall have sufficient short-time current rating to withstand both system short-circuit faults and inrush currents associated with energizing;

– the type of the contactor and circuit-breaker shall be selected with respect to the expected frequency of switching operations.

3.5.4 *Short-circuit protection (fuses)*

The rated voltage of the short-circuit protection shall be equal to or greater than the maximum network voltage with the power factor correction installation and/or filter in service.

The short-circuit protection shall be designed for continuous current (including harmonics) which can pass the power factor correction installation and/or filter at maximum source voltage, maximum frequency and extreme tolerances of the components, especially capacitor and reactor.

Le pouvoir de coupure doit être égal ou supérieur au courant de court-circuit qui peut apparaître au niveau de l'équipement de compensation et/ou de filtrage.

La protection contre les courts-circuits doit avoir une tenue de courte durée suffisante pour résister à la fois aux courts-circuits et aux courants d'appel survenant à la mise sous tension.

3.6 *Perturbations de la télécommande centralisée, provoquées par les condensateurs shunt et les filtres*

L'influence des équipements de compensation et de filtrage sur la télécommande centralisée est décrite ci-après, séparément pour chaque mode d'utilisation des condensateurs shunt.

3.6.1 *Condensateurs shunt*

Pour les signaux à fréquence musicale injectés dans le réseau à haute tension par la télécommande centralisée, la capacité de l'équipement de compensation constitue un circuit résonant série avec l'inductance du transformateur de distribution. Quand la fréquence de résonance de ce circuit est égale à la fréquence du signal ou proche de celle-ci, des problèmes peuvent survenir. La tension du signal de télécommande sur le réseau à basse tension peut augmenter jusqu'à un niveau inacceptable et, à cette fréquence, l'impédance du réseau haute tension peut être réduite, entraînant une charge supplémentaire du générateur du signal de télécommande. Quand la fréquence de résonance est très inférieure à celle du signal de télécommande centralisée, la tension de ce signal peut être réduite à un niveau inacceptable.

Ces phénomènes sont illustrés par les figures 7b et 7c concernant un circuit composé d'un transformateur et d'un condensateur correspondant à la figure 7a, pour quatre fréquences différentes de signal. Au voisinage de la fréquence de résonance, l'impédance du circuit est très inférieure à l'impédance nominale de la charge, ce qui peut entraîner une surcharge du générateur du signal de télécommande. D'autre part, la tension de ce signal peut être augmentée ou diminuée jusqu'à des niveaux susceptibles de perturber les relais récepteurs de télécommande.

Légende des symboles utilisés dans les figures 7a, 7b et 7c:

Z_{RC} impédance à la fréquence de télécommande centralisée du circuit transformateur-condensateur

Z_1 impédance nominale de la charge à la fréquence du réseau

S puissance du transformateur

ε_k tension de court-circuit du transformateur en pourcentage

Q puissance du condensateur shunt

U_{RC} tension du signal de télécommande sur le réseau à basse tension

U_{RCO} tension du signal de télécommande en l'absence de condensateur shunt

f_{RC} fréquence du signal de télécommande

Q_{RC} facteur de qualité du transformateur à la fréquence de télécommande

3.6.2 *Condensateurs avec inductance anti-harmonique*

Les inductances raccordées en série avec les condensateurs de l'équipement de compensation empêchent les perturbations du signal de télécommande centralisée lorsque la fréquence de résonance du circuit inductance-condensateur est nettement inférieure à la fréquence du signal de télécommande.

The interrupting rating shall be equal to or greater than the short-circuit current which can occur on the power factor correction installation and/or filter.

The short-circuit protection shall have sufficient short-time current rating to withstand both system short-circuit faults and inrush currents associated with energizing.

3.6 *Disturbance of ripple control installations by shunt capacitors and filters*

The influence of the power factor correction installations and filters on the ripple control installation is described below, for each method of use of shunt capacitors.

3.6.1 *Shunt capacitors*

For audio frequency signals injected into the high voltage network by a ripple control installation the capacitance of the power factor correction installation forms a series resonant circuit with the inductance of the distribution transformer. When the resonance frequency of this circuit is the same as or close to the signal frequency problems could occur. The voltage of the signal in the low voltage network may be increased to an unacceptable level, and the impedance, at this frequency, in the high voltage network may be reduced leading to additional loading of the ripple control signal generator. When the resonance frequency is much lower than that of the ripple control signal the voltage of this signal may be reduced to an unacceptable level.

An example of this is shown in figures 7b and 7c for a transformer-capacitor arrangement corresponding to figure 7a for four different ripple control signal frequencies. Close to the resonance frequency the impedance of the arrangement is much lower than the nominal load impedance which may lead to an overloading of the ripple control generator. On the other hand, the ripple control signal voltage can be increased or reduced to levels which may disturb the ripple control receivers.

Explanation of the symbols used in figures 7a, 7b and 7c:

Z_{RC} impedance at ripple control frequency of transformer-capacitor arrangement

Z_1 nominal load impedance at network frequency

S transformer rating

ε_k impedance voltage of the transformer in per cent

Q shunt capacitor rating

U_{RC} ripple control signal voltage in the low voltage network

U_{RCO} ripple control signal voltage when no shunt capacitor is connected

f_{RC} ripple control signal frequency

Q_{RC} quality factor of the transformer at ripple control signal frequency

3.6.2 *Detuned filter*

Reactors connected in series with the capacitors of power factor correction installations prevent such disturbances of the ripple control installation if the resonance frequency of the reactor-capacitor arrangement is lower than and far enough from the ripple control signal frequency.

Par exemple, la figure 5b montre que pour un signal dont le rapport *h* entre la fréquence du signal de télécommande et la fréquence du réseau vaut environ 10 (par exemple un signal à 492 Hz sur un réseau 50 Hz), l'impédance à la fréquence du signal n'est pas très différente de l'impédance à la fréquence fondamentale. Il n'y a alors pratiquement pas d'influence sur le fonctionnement de la télécommande. Pour un rapport de fréquence *h* compris entre 2 et 6 environ, l'impédance est relativement faible. En conséquence, à la fréquence du signal, la tension du signal sur le réseau basse tension et l'impédance du réseau haute tension sont réduites, ce qui peut perturber le fonctionnement de la télécommande centralisée.

Si la fréquence de résonance du circuit inductance-condensateur est supérieure à la fréquence du signal, son impédance est capacitive à la fréquence du signal. Ceci peut entraîner une résonance avec l'impédance inductive du transformateur de distribution et perturber ainsi la télécommande centralisée, de façon similaire à celle décrite en 3.6.1 pour les condensateurs installés sans inductance.

3.6.3 *Filtre accordé*

Un filtre accordé peut influencer le signal de la télécommande centralisée. L'impédance d'un filtre accordé est capacitive pour toutes les fréquences inférieures à la fréquence d'accord et inductive pour toutes les fréquences supérieures. Dans le premier cas, l'impédance du transformateur de distribution contribue à réduire l'impédance du réseau haute tension à la fréquence du signal et, dans le second cas, à réduire la tension de ce même signal dans le réseau basse tension. Dans les deux cas, la télécommande centralisée peut être perturbée.

Si la fréquence du signal de télécommande se situe entre les fréquences d'accord de deux filtres unitaires, la compensation totale ou partielle de l'impédance inductive vis-à-vis de l'impédance capacitive des deux filtres peut conduire à une impédance totale relativement élevée à la fréquence du signal de télécommande. On peut éviter de perturber le signal, par exemple en choisissant judicieusement les fréquences d'accord et/ou les valeurs de la capacité et de l'inductance des filtres accordés unitaires.

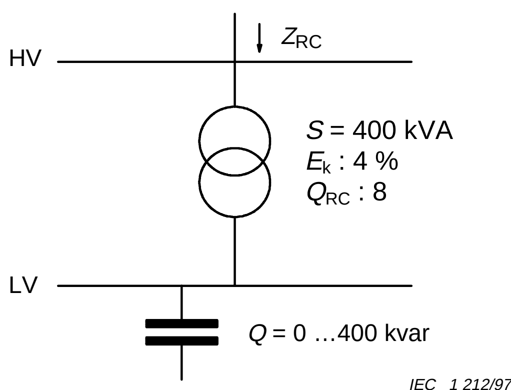


Figure 7a – Schéma unifilaire d'un circuit composé d'un transformateur et d'un condensateur

From figure 5b, for example, it can be seen that for a frequency ratio *h* between ripple control signal frequency and a network frequency of about 10 (for example for a signal frequency of 492 Hz in a 50 Hz network) the impedance at signal frequency is not very different from the impedance at fundamental frequency. So there may be practically no influence on the ripple control installation. For a frequency ratio h in the range of about 2 to 6, the impedance is relatively low. Consequently the signal voltage in the low voltage network and the impedance in the high voltage network at ripple control frequency will be reduced. So the correct function of the ripple control installation could be affected.

If the resonance frequency of the reactor-capacitor arrangement is higher than the ripple control signal frequency the impedance at signal frequency is capacitive. This may lead to resonance with the inductive impedance of the distribution transformer and thus disturb the ripple control installation in a similar way as explained in 3.6.1 for a capacitor installation without reactors.

3.6.3 *Tuned filter*

Tuned filters may influence the signal of ripple control installations. The impedance of a tuned filter unit is capacitive for all frequencies lower than the resonance frequency and inductive for all higher frequencies. The impedance of the distribution transformer contributes, in the first case, to reduce the impedance at ripple control signal frequency in the high voltage network and, in the second case, to reduce the ripple control signal voltage in the low voltage network. In both cases, the ripple control installation may be disturbed.

If the ripple control signal frequency is between the resonance frequencies of two tuned filter units, total or partial compensation of the inductive impedance with respect to the capacitive impedance of the two filters may give a relatively high impedance at ripple control signal frequency. Disturbance may also be avoided, for example, by careful choice of the tuning frequencies and/or the capacitance and inductance values of the tuned filter units.

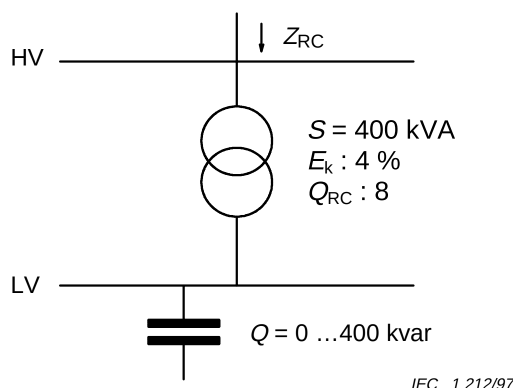


Figure 7a – One-line diagram of transformer-capacitor arrangement

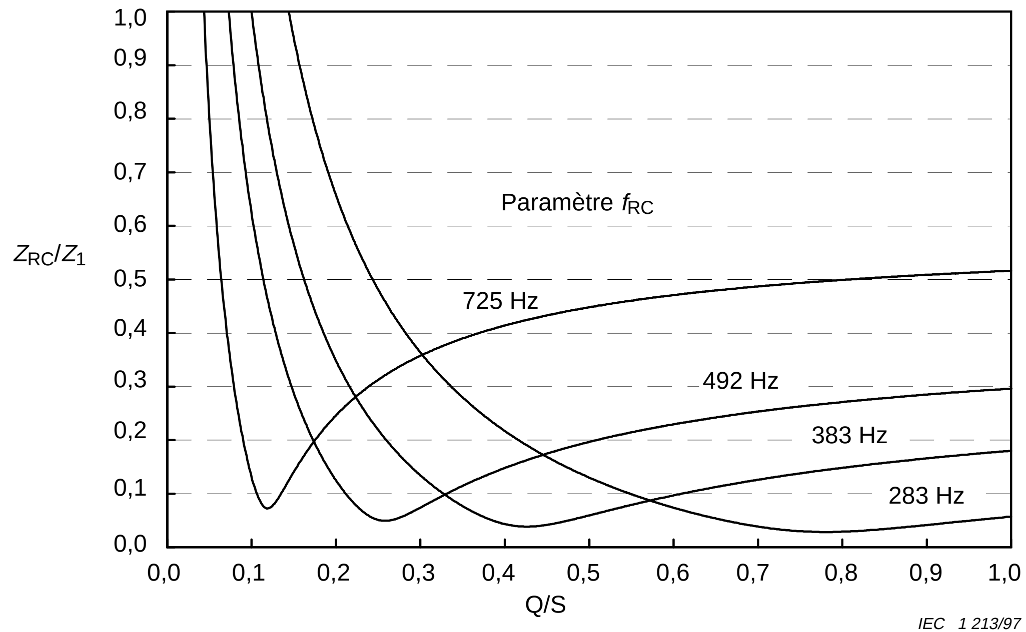


Figure 7b – Impédance relative Z_{RC}/Z_1

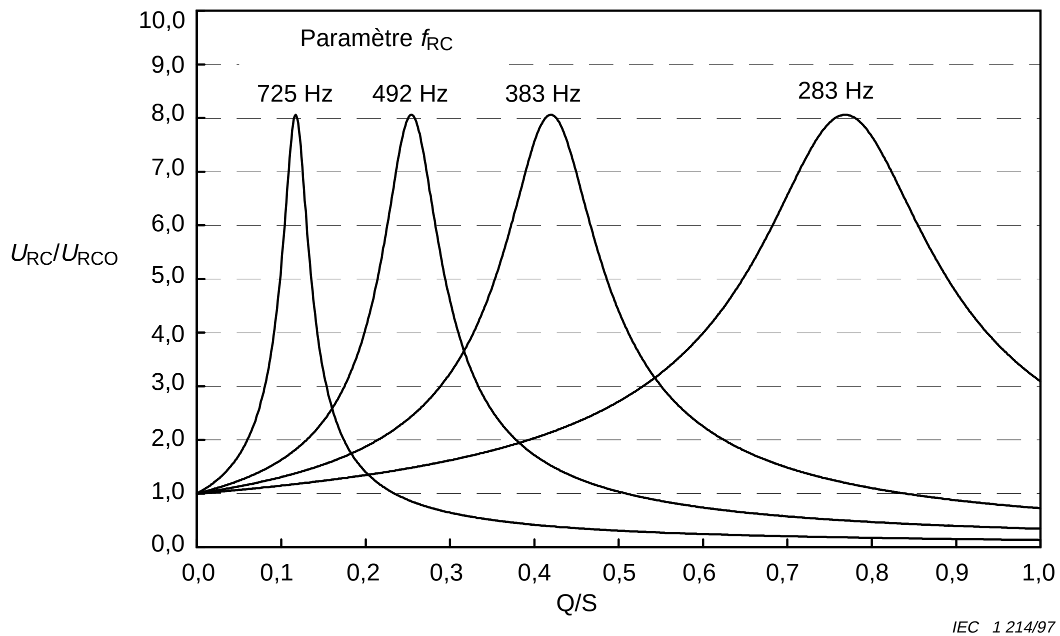


Figure 7c – Tension relative du signal U_{RC}/U_{RCO}

4 Condensateurs shunt et filtres pour les réseaux de tension supérieure à 1 000 V

4.1 *Introduction*

Tous les principes décrits dans la partie concernant la basse tension s'appliquent également aux réseaux à haute tension. Toutefois, certaines prescriptions spécifiques ne concernent que la haute tension.

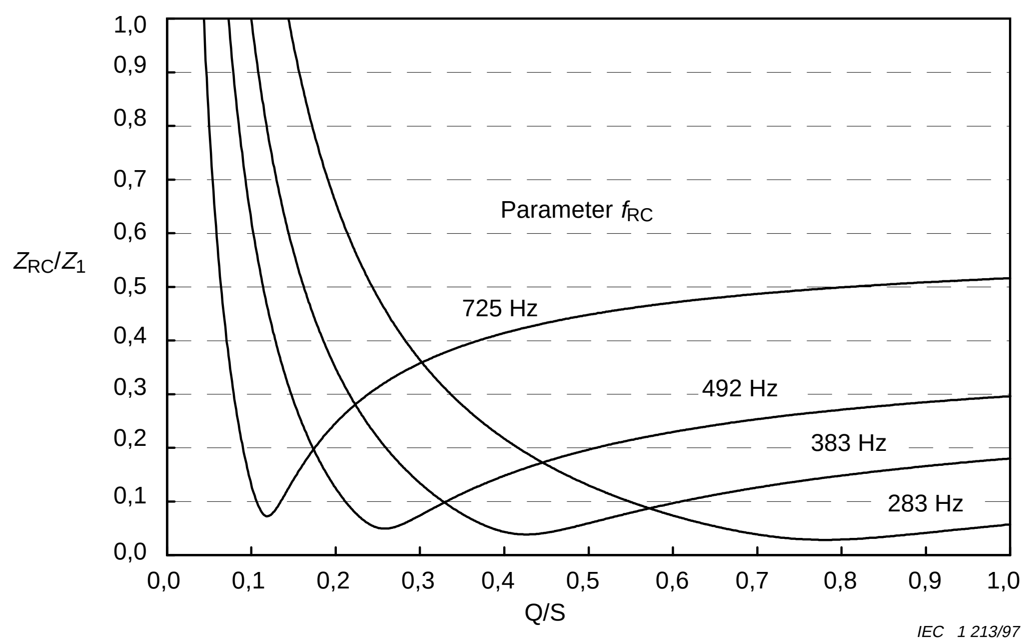


Figure 7b – Relative impedance Z_{RC}/Z_1

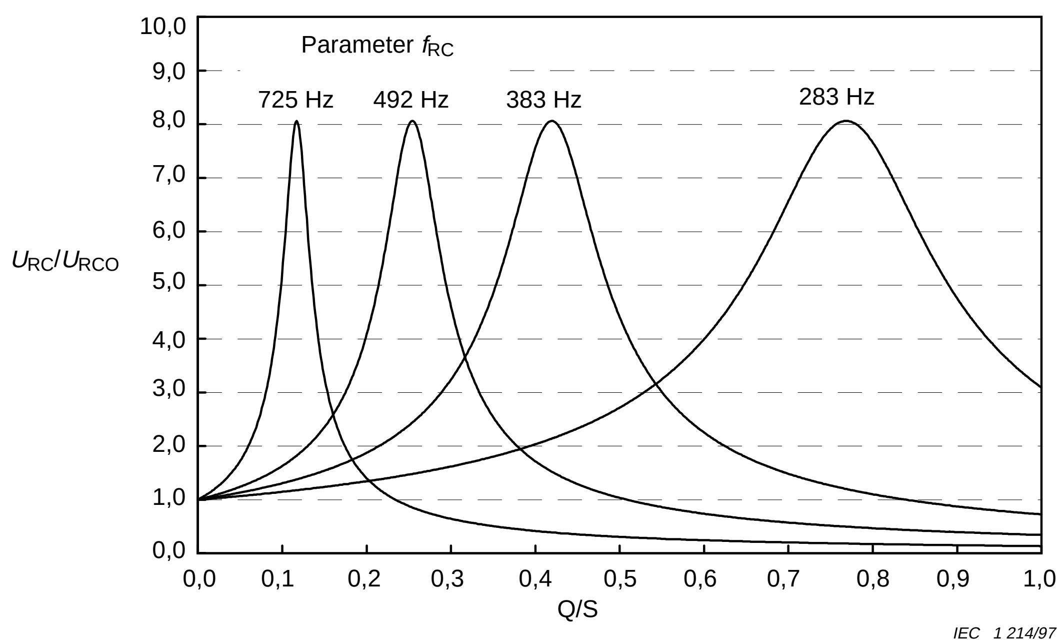


Figure 7c – Relative signal voltage U_{RC}/U_{RCO}

4 Shunt capacitors and filters for networks having a voltage above 1 000 V

4.1 *Introduction*

All the principles described in the low voltage section also apply to high voltage networks. There are however specific requirements applicable to this voltage.

4.2 *Prescriptions spécifiques*

La configuration du réseau, et donc la puissance de court-circuit, sont généralement variables dans les réseaux à haute tension. Dans la conception de l'équipement, on doit en tenir compte pour toutes les configurations.

En haute tension, l'équipement de compensation peut être placé à l'intérieur ou à l'extérieur, et sa conception est affectée par les points suivants:

- les conditions atmosphériques défavorables, la pollution, etc., nécessitant une ligne de fuite et des distances d'isolement plus importantes;
- les conditions climatiques;
- les contraintes mécaniques, les effets sismiques;
- le rayonnement solaire.

L'équipement de compensation doit être conçu en tenant compte des harmoniques générés par les charges électriques et tout harmonique présent dans le réseau.

4.3 *Choix de l'équipement de compensation*

Il convient de procéder à une étude du réseau pour définir l'équipement le plus approprié. Dans toute la mesure du possible, il convient de mesurer la distorsion harmonique, bien qu'il faille être très prudent dans l'interprétation des résultats.

Il convient que l'étude de réseau tienne compte des points suivants:

- l'étude de toutes les configurations de l'installation, y compris les fonctionnements exceptionnels ou de secours ainsi que les futures extensions éventuelles. On doit porter une attention particulière aux machines électriques (générateurs, compensateurs synchrones), à la capacité des câbles, aux impédances de ligne, etc.;
- les harmoniques générés (taux de distorsion) dans toutes les configurations de fonctionnement. Il convient de tenir compte des sources d'harmoniques existant dans le réseau. Il est nécessaire de mesurer et/ou de calculer les courants harmoniques. Des valeurs déterminées à partir des seules tensions harmoniques ne sont pas suffisamment précises étant donné que les harmoniques sont générés par des sources de courant et non de tension. Si un utilisateur prévoit d'installer un filtre dans une installation qui n'est pas séparée du réseau public par un transformateur ou une autre impédance significative, il faut tenir compte de l'effet de tous les autres condensateurs shunt et des filtres alimentés par ce réseau;
- les équipements de compensation existants, filtres existants accordés ou non accordés;
- l'influence des équipements de compensation et des filtres sur la télécommande centralisée doit être étudiée afin de s'assurer du fonctionnement correct de l'ensemble.

4.4 *Types de filtres*

En général, on utilise des filtres de premier, deuxième et troisième ordre (voir figures 8a, 8b, 8c, 8d et 8e). L'ordre d'un filtre peut être défini par le nombre d'éléments réactifs du circuit. Des considérations techniques et/ou économiques peuvent conduire à utiliser des circuits d'amortissement. Dans ce cas, une évaluation des pertes est nécessaire. Le plus souvent, les filtres sont accordés sur les rangs harmoniques 5, 7, 11, 13, 17, 19, 23 et 25.

Si un niveau de distorsion doit être garanti, on doit tenir compte des tolérances de fabrication des condensateurs et des inductances. Lorsque l'on utilise des filtres, il n'est pas toujours possible de maintenir à la fois la distorsion harmonique et le facteur de puissance dans des limites données.

4.2 *Specific requirements*

The system configuration and, consequently, the short-circuit power are generally variable in high voltage networks. Variations shall be considered for all conditions when designing equipment.

High voltage power factor correction equipment may be installed indoors or outdoors, the following having an effect on the design:

– adverse atmospheric conditions, pollution, etc, requiring increased creepage and clearance distances;

– climatic conditions;

– mechanical stress, seismic forces;

– solar radiation.

Harmonics generated by the electrical loads and any harmonics existing on the network have to be considered when designing power factor correction installations.

4.3 *Choice of power factor correction installation*

A network analysis should be carried out to determine the most appropriate equipment to be installed. Whenever possible existing harmonic distortion should be measured although the interpretation of the results should be considered with care.

The network analysis should take into account the following points:

– all network configurations should be considered, including exceptional and emergency arrangements as well as possible future extensions. Special attention shall be paid to electrical machines (generators, synchronous compensators), cable capacitance, line impedance, etc.;

– harmonic generation (distortion ratios) obtained in all the different working configurations. This should take into account the existing harmonic sources on the system. Measurements and/or calculation of the harmonic currents is necessary. Figures deduced from harmonic voltage distortion alone are not accurate as harmonics are generated by current not by voltage sources. When the user plans to install a filter on a system which is not separated from the utilities network by an interposing transformer or another significant impedance, the effect of all other shunt capacitors and filters on the network have to be considered;

– existing power factor correction installations, detuned and tuned filters;

– the influence of power factor correction installations and filters on ripple control installations shall be investigated to ensure that system malfunction does not occur.

4.4 *Type of filters*

Filter systems of 1st, 2nd, and 3rd order are usually considered (see figures 8a, 8b, 8c, 8d and 8e). The order of a filter can be determined by the number of reactive components in the circuit. Damping circuits may be considered due to technical and/or economical reasons. If a damped filter is used, loss evaluation is necessary. The most frequently used harmonic orders for filter tuning are 5, 7, 11, 13, 17, 19, 23, 25.

When a harmonic distortion limit has to be guaranteed, account shall be taken of capacitor and reactor manufacturing tolerances. With filters it is not always possible to maintain both the harmonic distortion and the power factor within given limits.

4.5 *Choix des composants des filtres*

Normalement, un filtre à haute tension comporte les composants suivants:

- disjoncteur;
- condensateurs;
- inductances;
- résistances;
- équipement de protection.

Pour dimensionner ces composants, on se base généralement sur les contraintes calculées dans les conditions de service les plus dures. Dans la conception de l'équipement de compensation ou de filtrage, il faut prendre en compte les courants harmoniques produits par les charges ainsi que tout courant ou tension harmonique existant sur le réseau.

Il convient de s'assurer que les facteurs suivants n'auront pas de répercussions inacceptables sur le fonctionnement de l'ensemble de filtrage: tolérances de fabrication, influence de la température et du vieillissement, fonctionnement des éventuels fusibles internes ou externes, éventuelle non-linéarité des composants des filtres ainsi que les variations de la fréquence du réseau.

4.5.1 *Disjoncteur*

La commutation des filtres requiert des caractéristiques particulières pour l'appareillage de manoeuvre. Par conséquent, on doit tenir compte des règles suivantes:

- le disjoncteur doit être sans réamorçage;
- la tension assignée du disjoncteur doit être égale ou supérieure à la tension maximale du réseau lorsque les filtres sont en service;
- le disjoncteur doit être dimensionné pour le courant permanent susceptible de traverser le filtre à la tension maximale, à la fréquence maximale et à la tolérance maximale de la capacité;
- le pouvoir de coupure doit être égal ou supérieur au courant de court-circuit pouvant apparaître en aval du disjoncteur;
- le disjoncteur doit avoir une tenue de courte durée suffisante pour résister à la fois aux courts-circuits et aux courants d'appel survenant à la mise sous tension;
- le type de disjoncteur doit être choisi en fonction de la fréquence prévisible des manoeuvres.

4.5.2 *Condensateurs*

La batterie de condensateur représente la partie essentielle du filtre. Par conséquent, il convient d'effectuer une étude minutieuse afin de parvenir à une conception optimale du condensateur.

Le courant du filtre comprend une composante fondamentale et des composantes harmoniques. Comme l'amplitude des harmoniques peut être très élevée, il est nécessaire d'en tenir compte dans la définition des valeurs assignées des condensateurs.

Les définitions et critères de conception suivants sont spécifiques aux condensateurs de filtrage:

- la tension et le courant assignés des condensateurs et les tolérances: voir la norme particulière du condensateur;
- il convient que les caractéristiques assignées d'un condensateur unitaire tiennent compte de la défaillance d'un de ses éléments ou de la fusion d'un fusible et qu'elles soient coordonnées avec les protections du filtre. Si pendant le fonctionnement, la variation de capacité dépasse la plage admissible pour le filtre, il convient que ce dernier soit mis hors tension.

4.5 *Filter components selection*

A high voltage filter normally consists of the following components:

– circuit-breaker;
– capacitors;
– reactors;
– resistors;
– protection equipment.

The determination of ratings for these components is usually based on the calculated stresses during worst service conditions. Harmonic currents generated by the electrical loads and any harmonic current or voltage existing an the network have to be considered when designing power factor correction or filter installation.

It should be checked that the manufacturing tolerances, the influence of temperature and ageing, the operation of internal or external fuses if any, the possible non-linearity of the filter components as well as the variations of the network frequency will not unacceptably influence the function of the filter.

4.5.1 *Circuit-breaker*

The switching of filters requires some special features of the switching device. The following aspects shall therefore be considered:

– the circuit-breaker shall be restrike-free;

– the rated voltage of the circuit-breaker shall be equal to or higher than the maximum network voltage with the filter in service;

– the circuit-breaker shall be designed for continuous current which can pass the filter at maximum source voltage, maximum frequency and capacitance deviation;

– the interrupting capacity shall be equal to or greater than the short-circuit current which can occur on the filter side of the circuit-breaker;

– the circuit-breaker shall have sufficient short-time current rating to withstand both system short-circuit faults and inrush currents associated with energizing;

– the type of the circuit-breaker shall be selected with respect to the expected frequency of switching operations.

4.5.2 *Capacitors*

The capacitor bank is the fundamental part in each filter equipment. A thorough study should therefore be performed in order to obtain optimum capacitor design.

The filter current consists of fundamental and harmonic frequency components. As the magnitude of harmonic components may be very high, it is necessary to take them into account when defining rated data of the capacitors.

The following definitions and designing criteria are specific to filter capacitors:

– rated capacitor voltage, rated capacitor current and tolerances: see the relevant capacitor standard;

– the ratings of a capacitor should make allowances for element failure or fuse operation and should co-ordinate with filter protection. During service, if the capacitance change exceeds the acceptable range for the filter, the filter should be disconnected from the system.

4.5.3 *Inductances*

Pour dimensionner les inductances des filtres, il faut tenir compte des aspects suivants:

– la charge thermique due aux valeurs maximales du courant fondamental et des courants harmoniques;

– la tolérance de fabrication de l'inductance: dans la plupart des applications une valeur de ±3 % est acceptable. Dans certains cas, des prises de réglage peuvent être nécessaires;

– le courant de court-circuit survenant en cas de défaut;

– la linéarité dans les plages de courant et de fréquence;

– les pertes par courants de Foucault dans les parties métalliques adjacentes, par exemple le châssis de l'équipement, les prises de terre et les structures en acier des bâtiments.

4.5.4 *Résistances*

Pour dimensionner les résistances des filtres, il convient de tenir compte des aspects suivants:

– le courant efficace total traversant la résistance;

– l'inductance de la résistance;

– la tolérance de fabrication et le coefficient de température de la résistance.

4.5.5 *Protection par relais*

En général, le dispositif de protection comprend:

– la protection contre les surcharges dues aux harmoniques;

– la protection contre les surintensités;

– la protection contre les défauts à la terre;

– la protection contre les minima de tension;

– la protection de déséquilibre de la batterie de condensateurs.

4.6 *Perturbations de la télécommande centralisée, provoquées par les condensateurs shunt et les filtres*

L'influence des équipements de compensation et des filtres sur la télécommande centralisée doit être étudiée afin de s'assurer du fonctionnement correct de l'ensemble.

Il convient que les fréquences d'accord des équipements de compensation ne coïncident pas avec la fréquence du signal de télécommande et qu'elles en soient suffisamment éloignées. L'impédance inductive de la ligne entre le point d'injection de la télécommande centralisée et l'équipement de compensation peut réduire ou augmenter la tension du signal de la télécommande centralisée. Elle est réduite si l'impédance de l'équipement de compensation est inductive à la fréquence du signal, et augmentée si cette impédance est capacitive. Il convient de s'assurer que l'influence sur le signal de la télécommande centralisée reste dans des limites acceptables, en se référant aux prescriptions générales de 3.6.

4.5.3 *Reactors*

When selecting filter reactors, the following aspects shall be considered:

– thermal load due to the maximum fundamental and harmonic currents;

– manufacturing tolerance of inductance: for most filter applications ±3 % is acceptable. In special cases adjustment taps may be required;

– short-circuit current which can occur during fault conditions;

– linear characteristic within the current and frequency ranges;

– the effects of eddy current losses in adjacent metallic parts, for example equipment frame, earthing system and building structural steel.

4.5.4 *Resistors*

When selecting filter resistors, the following aspects should be considered:

– total r.m.s. current through the resistor;

– inductance of the resistor;

– manufacturing tolerance and temperature coefficient of the resistance.

4.5.5 *Relay protection*

The protection system normally consists of:

– harmonic overload protection;

– overcurrent protection;

– earth fault protection;

– undervoltage protection;

– unbalance protection of the capacitor bank.

4.6 *Disturbance of ripple control installations by shunt capacitors and filters*

The influence of power factor correction installations and filters on ripple control installations shall be investigated to ensure that system malfunction does not occur.

The tuning frequencies of the power factor correction installation should not be the same as the ripple control signal frequency, but far enough from it. Due to the inductive impedance of the line between the injection point of the ripple control installation and the power factor correction installation, the ripple control signal voltage may be reduced or increased. It will be reduced if the impedance of the power factor correction installation is inductive at ripple control signal frequency and increased if it is capacitive. It should be ensured that the influence on the ripple control signal voltage is within acceptable limits, referring to the general requirements of 3.6.

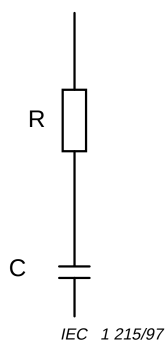


Figure 8a – Filtre du 1er ordre

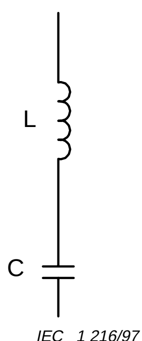


Figure 8b – Filtre du 2ème ordre – filtre passe bande

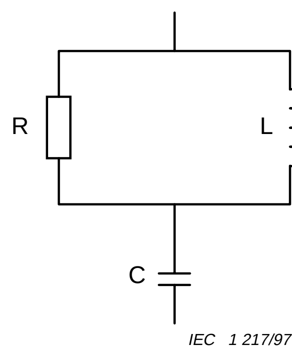


Figure 8c – Filtre du 2ème ordre – filtre amorti avec élément résistif

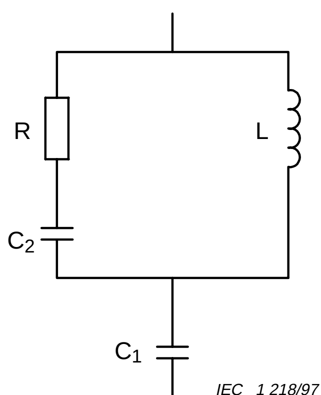


Figure 8d – Filtre du 3ème ordre – filtre amorti

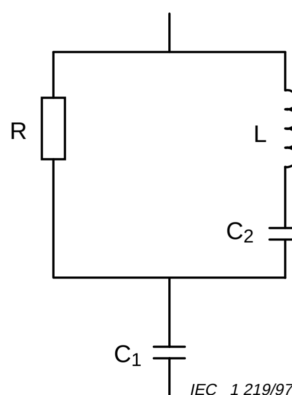


Figure 8e – Filtre du 3ème ordre – filtre de type C

Figure 8 – Types de filtres pour installations à haute tension

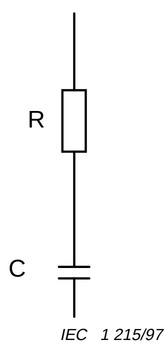


Figure 8a – 1st order filter

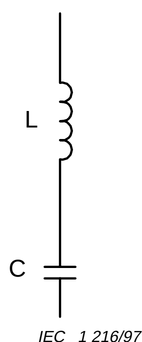


Figure 8b – 2nd order filter – band-pass filter

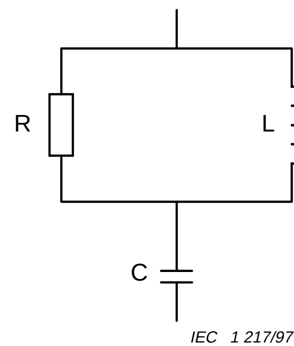


Figure 8c – 2nd order filter – damped filter with resistive element

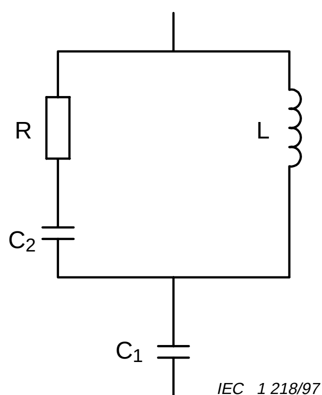


Figure 8d – 3rd order filter – damped filter

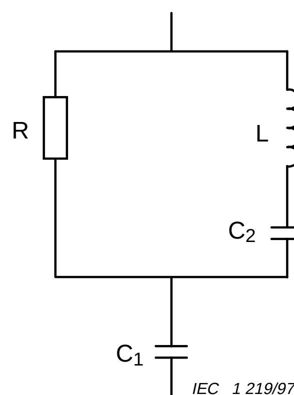


Figure 8e – 3rd order filter – C type

Figure 8 – Types of filters for high-voltage applications

Annexe A
(informative)

Bibliographie

[1] CEI 60110:1973, *Recommandation concernant les condensateurs pour les installations de génération de chaleur par induction soumis à des fréquences comprises entre 40 Hz et 24 000 Hz*

[2] CEI 60143:1992, *Condensateurs série destinés à être installés sur des réseaux*

[3] CEI 60358:1990, *Condensateurs de couplage et diviseurs capacitifs*

[4] CEI 61071: *Condensateurs pour l'électronique de puissance*

[5] CEI 60252:1993, *Condensateurs des moteurs à courant alternatif*

[6] CEI 61048:1991, *Condensateurs destinés à être utilisés dans les circuits de lampes tubulaires à fluorescence et autres lampes à décharge. Prescriptions générales et de sécurité*

[7] CEI 61049:1991, *Condensateurs destinés à être utilisés dans les circuits de lampes tubulaires à fluorescence et autres lampes à décharge. Prescriptions de performances*

[8] *Harmoniques, paramètres, caractéristiques, méthode d'étude, estimation de valeurs existantes en réseau.* CIGRE, WG 36-05, *Electra* n° **77**

CEI 60050(421):1990, *Vocabulaire Electrotechnique International (VEI) – Chapitre 421: Transformateurs de puissance et bobines d'inductance*

CEI 60050(436):1990, *Vocabulaire Electrotechnique International (VEI) – Chapitre 436: Condensateurs de puissance*

CEI 60056:1987, *Disjoncteurs à courant alternatif à haute tension*

CEI 60146: *Convertisseurs à semi-conducteurs*

CEI 60242:1967, *Fréquences normales pour installations de télécommande centralisée*

CEI 60255-6:1988, *Relais électriques – Partie 6: relais de mesure et dispositifs de protection*

CEI 60265-1:1983, *Interrupteurs à haute tension – Partie 1: Interrupteurs à haute tension de tensions assignées supérieures à 1 kV et inférieures à 52 kV*

CEI 60265-2:1988, *Interrupteurs à haute tension – Partie 2: Interrupteurs à haute tension de tension assignée égale ou supérieure à 52 kV*

CEI 60269, *Fusibles basse tension*

CEI 60282, *Fusibles à haute tension*

CEI 60289:1988, *Bobines d'inductance*

CEI 60291:1969, *Définitions relatives aux coupe-circuit à fusibles*

CEI 60549:1976, *Coupe-circuit à fusibles haute tension destinés à la protection externe des condensateurs de puissance en dérivation*

Annex A
(informative)

Bibliography

[1] IEC 60110:1973, *Recommendation for capacitors for inductive heat generating plants operating at frequencies between 40 Hz and 24 000 Hz*

[2] IEC 60143:1992, *Series capacitors for power systems*

[3] IEC 60358:1990, *Coupling capacitors and capacitor dividers*

[4] IEC 601071: *Power electronic capacitors*

[5] IEC 60252:1993, *AC motor capacitors*

[6] IEC 61048:1991, *Capacitors for use in tubular fluorescent and other discharge lamp circuits. General and safety requirements*

[7] IEC 61049:1991, *Capacitors for use in tubular fluorescent and other discharge lamp circuits. Performance requirements*

[8] *Harmonics characteristic parameters, methods of study, estimates of existing values in network*, CIGRE, WG36-05, *Electra* no. **77**

IEC 60050(421):1990, *International Electrotechnical Vocabulary (IEV) – Chapter 421: Power transformers and reactors*

IEC 60050(436):1990, *International Electrotechnical Vocabulary (IEV) – Chapter 436: Power capacitors*

IEC 60056:1987, *High-voltage alternating-current circuit-breakers*

IEC 60146: *Semiconductor convertors*

IEC 60242:1967, *Standard frequencies for centralized network control installations*

IEC 60255-6:1988, *Electrical relays – Part 6: Measuring relays and protection equipment*

IEC 60265-1:1983, *High-voltage switches – Part 1: High-voltage switches for rated voltages above 1 kV and less than 52 kV*

IEC 60265-2:1988, *High-voltage switches – Part 2: High-voltage switches for rated voltages of 52 kV and above*

IEC 60269: *Low-voltage fuses*

IEC 60282: *High-voltage fuses*

IEC 60289:1988, *Reactors*

IEC 60291:1969, *Fuse definitions*

IEC 60549:1976, *High-voltage fuses for the external protection of shunt power capacitors*

CEI 60831-1:1996, *Condensateurs shunt de puissance autorégénérateurs pour des réseaux à courant alternatif de tension assignée inférieure ou égale à 1 000 V – Partie 1: Généralités – Caractéristiques fonctionnelles, essais et valeurs assignées – Règles de sécurité – Guide d'installation et d'exploitation*

CEI 60871-1:1987, *Condensateurs shunt destinés à être installés sur des réseaux à courant alternatif de tension assignée supérieure à 660 V – Partie 1: Généralités, caractéristiques fonctionnelles, essais et valeurs assignées – Règles de sécurité – Guide d'installation et d'exploitation*

CEI 60871-2:1987, *Condensateurs shunt destinés à être installés sur des réseaux à courant alternatif de tension assignée supérieure à 660 V – Partie 2: Essais d'endurance*

CEI 60931-1:1996, *Condensateurs shunt de puissance non autorégénérateurs pour réseaux à courant alternatif de tension assignée inférieure ou égale à 1 000 V – Partie 1: Généralités – Caractéristiques fonctionnelles, essais et valeurs assignées – Règles de sécurité – Guide d'installation et d'exploitation*

CEI 61000-2-2:1990, *Compatibilité électromagnétique (CEM) – Partie 2: Environnement – Section 2: Niveaux de compatibilité pour les perturbations conduites basse fréquence et la transmission de signaux sur les réseaux publics d'alimentation à basse tension*

____

IEC 60831-1:1996, *Shunt power capacitors of the self-healing type for a.c. systems having a rated voltage up to and including 1 000 V – Part 1: General – Performance, testing and rating – Safety requirements – Guide for installation and operation*

IEC 60871-1:1987, *Shunt capacitors for a.c. power systems having a rated voltage above 660 V – Part 1: General – Performance, testing and rating – Safety requirements – Guide for installation and operation*

IEC 60871-2:1987, *Shunt capacitors for a.c. power systems having a rated voltage above 660 V – Part 2: Endurance testing*

IEC 60931-1:1996, *Shunt power capacitors of the non-self-healing type for a.c. systems having a rated voltage up to and including 1 000 V – Part 1: General – Performance, testing and rating-Safety requirements – Guide for installation and operation*

IEC 61000-2-2:1990, *Electromagnetic compatibility (EMC) – Part 2: Environment – Section 2: Compatibility levels for low-frequency conducted disturbances and signalling in public low-voltage power supply systems*



Standards Survey

We at the IEC want to know how our standards are used once they are published.

The answers to this survey will help us to improve IEC standards and standard related information to meet your future needs

Would you please take a minute to answer the survey on the other side and mail or fax to:

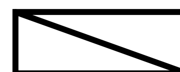
Customer Service Centre (CSC)
International Electrotechnical Commission
3, rue de Varembé
Case postale 131
1211 Geneva 20
Switzerland

or

Fax to: CSC at +41 22 919 03 00

Thank you for your contribution to the standards making process.

Nicht frankieren
Ne pas affranchir



Non affrancare
No stamp required

A Prioritaire

RÉPONSE PAYÉE

SUISSE

Customer Service Centre (CSC)
International Electrotechnical Commission
3, rue de Varembé
Case postale 131
1211 GENEVA 20
Switzerland

1.

No. of IEC standard:

....

2.

Tell us why you have the standard. (check as many as apply). I am:

- ☐ the buyer
- ☐ the user
- ☐ a librarian
- ☐ a researcher
- ☐ an engineer
- ☐ a safety expert
- ☐ involved in testing
- ☐ with a government agency
- ☐ in industry
- ☐ other.......................................

3.

This standard was purchased from?

....

4.

This standard will be used (check as many as apply):

- ☐ for reference
- ☐ in a standards library
- ☐ to develop a new product
- ☐ to write specifications
- ☐ to use in a tender
- ☐ for educational purposes
- ☐ for a lawsuit
- ☐ for quality assessment
- ☐ for certification
- ☐ for general information
- ☐ for design purposes
- ☐ for testing
- ☐ other.......................................

5.

This standard will be used in conjunction with (check as many as apply):

- ☐ IEC
- ☐ ISO
- ☐ corporate
- ☐ other (published by...................)
- ☐ other (published by...................)
- ☐ other (published by...................)

6.

This standard meets my needs (check one)

- ☐ not at all
- ☐ almost
- ☐ fairly well
- ☐ exactly

7.

Please rate the standard in the following areas as (1) bad, (2) below average, (3) average, (4) above average, (5) exceptional, (0) not applicable:

- ☐ clearly written
- ☐ logically arranged
- ☐ information given by tables
- ☐ illustrations
- ☐ technical information

8.

I would like to know how I can legally reproduce this standard for:

- ☐ internal use
- ☐ sales information
- ☐ product demonstration
- ☐ other................................

9.

In what medium of standard does your organization maintain most of its standards (check one):

- ☐ paper
- ☐ microfilm/microfiche
- ☐ mag tapes
- ☐ CD-ROM
- ☐ floppy disk
- ☐ on line

9A.

If your organization currently maintains part or all of its standards collection in electronic media, please indicate the format(s):

- ☐ raster image
- ☐ full text

10.

In what medium does your organization intend to maintain its standards collection in the future (check all that apply):

- ☐ paper
- ☐ microfilm/microfiche
- ☐ mag tape
- ☐ CD-ROM
- ☐ floppy disk
- ☐ on line

10A.

For electronic media which format will be chosen (check one)

- ☐ raster image
- ☐ full text

11.

My organization is in the following sector (e.g. engineering, manufacturing)

....

12.

Does your organization have a standards library:

- ☐ yes
- ☐ no

13.

If you said yes to 12 then how many volumes:

....

14.

Which standards organizations published the standards in your library (e.g. ISO, DIN, ANSI, BSI, etc.):

....

15.

My organization supports the standards-making process (check as many as apply):

- ☐ buying standards
- ☐ using standards
- ☐ membership in standards organization
- ☐ serving on standards development committee
- ☐ other................................

16.

My organization uses (check one)

- ☐ French text only
- ☐ English text only
- ☐ Both English/French text

17.

Other comments:

....

....

....

....

....

....

18.

Please give us information about you and your company

name: ....

job title:..

company: ....

address:...

....

....

....

No. employees at your location:.........

turnover/sales:.................................



Enquête sur les normes

La CEI se préoccupe de savoir comment ses normes sont accueillies et utilisées.

Les réponses que nous procurera cette enquête nous aideront tout à la fois à améliorer nos normes et les informations qui les concernent afin de toujours mieux répondre à votre attente.

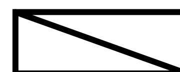
Nous aimerions que vous nous consacriez une petite minute pour remplir le questionnaire joint que nous vous invitons à retourner au:

Centre du Service Clientèle (CSC)
Commission Electrotechnique Internationale
3, rue de Varembé
Case postale 131
1211 Genève 20
Suisse

Télécopie: IEC/CSC +41 22 919 03 00

Nous vous remercions de la contribution que vous voudrez bien apporter ainsi à la Normalisation Internationale

Nicht frankieren
Ne pas affranchir



Non affrancare
No stamp required

A Prioritaire

RÉPONSE PAYÉE

SUISSE

Centre du Service Clientèle (CSC)
Commission Electrotechnique Internationale
3, rue de Varembé
Case postale 131
1211 GENÈVE 20
Suisse

1.

Numéro de la Norme CEI:

....

2.

Pourquoi possédez-vous cette norme? (plusieurs réponses possibles). Je suis:

- ☐ l'acheteur
- ☐ l'utilisateur
- ☐ bibliothécaire
- ☐ chercheur
- ☐ ingénieur
- ☐ expert en sécurité
- ☐ chargé d'effectuer des essais
- ☐ fonctionnaire d'Etat
- ☐ dans l'industrie
- ☐ autres ....

3.

Où avez-vous acheté cette norme?

....

4.

Comment cette norme sera-t-elle utilisée? (plusieurs réponses possibles)

- ☐ comme reférence
- ☐ dans une bibliothèque de normes
- ☐ pour développer un produit nouveau
- ☐ pour rédiger des spécifications
- ☐ pour utilisation dans une soumission
- ☐ à des fins éducatives
- ☐ pour un procès
- ☐ pour une évaluation de la qualité
- ☐ pour la certification
- ☐ à titre d'information générale
- ☐ pour une étude de conception
- ☐ pour effectuer des essais
- ☐ autres ....

5.

Cette norme est-elle appelée à être utilisée conjointement avec d'autres normes? Lesquelles? (plusieurs réponses possibles):

- ☐ CEI
- ☐ ISO
- ☐ internes à votre société
- ☐ autre (publiée par).....................)
- ☐ autre (publiée par).....................)
- ☐ autre (publiée par).....................)

6.

Cette norme répond-elle à vos besoins?

- ☐ pas du tout
- ☐ à peu près
- ☐ assez bien
- ☐ parfaitement

7.

Nous vous demandons maintenant de donner une note à chacun des critères ci-dessous (1, mauvais; 2, en-dessous de la moyenne; 3, moyen; 4, au-dessus de la moyenne; 5, exceptionnel; 0, sans objet)

- ☐ clarté de la rédaction
- ☐ logique de la disposition
- ☐ tableaux informatifs
- ☐ illustrations
- ☐ informations techniques

8.

J'aimerais savoir comment je peux reproduire légalement cette norme pour:

- ☐ usage interne
- ☐ des renseignements commerciaux
- ☐ des démonstrations de produit
- ☐ autres ....

9.

Quel support votre société utilise-t-elle pour garder la plupart de ses normes?

- ☐ papier
- ☐ microfilm/microfiche
- ☐ bandes magnétiques
- ☐ CD-ROM
- ☐ disquettes
- ☐ abonnement à un serveur électronique

9A.

Si votre société conserve en totalité ou en partie sa collection de normes sous forme électronique, indiquer le ou les formats:

- ☐ format tramé (ou image balayée ligne par ligne)
- ☐ texte intégral

10.

Sur quels supports votre société prévoit-elle de conserver sa collection de normes à l'avenir (plusieurs réponses possibles):

- ☐ papier
- ☐ microfilm/microfiche
- ☐ bandes magnétiques
- ☐ CD-ROM
- ☐ disquettes
- ☐ abonnement à un serveur électronique

10A.

Quel format serait retenu pour un moyen électronique? (une seule réponse)

- ☐ format tramé
- ☐ texte intégral

11.

A quel secteur d'activité appartient votre société? (par ex. ingénierie, fabrication)

....

12.

Votre société possède-t-elle une bibliothèque de normes?

- ☐ Oui
- ☐ Non

13.

En combien de volumes dans le cas affirmatif?

....

14.

Quelles organisations de normalisation ont publié les normes de cette bibliothèque (ISO, DIN, ANSI, BSI, etc.):

....

15.

Ma société apporte sa contribution à l'élaboration des normes par les moyens suivants (plusieurs réponses possibles):

- ☐ en achetant des normes
- ☐ en utilisant des normes
- ☐ en qualité de membre d'organisations de normalisation
- ☐ en qualité de membre de comités de normalisation
- ☐ autres ....

16.

Ma société utilise (une seule réponse)

- ☐ des normes en français seulement
- ☐ des normes en anglais seulement
- ☐ des normes bilingues anglais/français

17.

Autres observations

....

....

....

....

....

18.

Pourriez-vous nous donner quelques informations sur vous-mêmes et votre société?

nom ....

fonction..

nom de la société ....

adresse..

....

....

....

nombre d'employés..........................

chiffre d'affaires:..............................

Publications de la CEI préparées par le Comité d’Etudes n° 33

60110 (1973) Recommandation concernant les condensateurs pour les installations de génération de chaleur par induction soumis à des fréquences comprises entre 40 et 24 000 Hz.

60143 (1992) Condensateurs série destinés à être installés sur des réseaux.

60143-2 (1994) Partie 2: Matériel de protection pour les batteries de condensateurs série.

60252 (1993) Condensateurs des moteurs à courant alternatif.

60358 (1990) Condensateurs de couplage et diviseurs capacitifs.

60593 (1977) Coupe-circuit internes et déconnecteurs internes à surpression pour condensateurs shunt.
Modification n° 2 (1986).

60594 (1977) Coupe-circuit internes et déconnecteurs internes à surpression pour condensateurs pour installation de génération de chaleur par induction.
Modification n° 2 (1987).

60595 (1977) Coupe-circuit internes pour condensateurs série.
Modification n° 2 (1987).

60831:– Condensateurs shunt de puissance autorégénérateurs pour réseaux à courant alternatif de tension assignée inférieure ou égale à 1 000 V.

60831-1 (1996) Partie 1: Généralités – Caractéristiques fonctionnelles, essais et valeurs assignées – Règles de sécurité – Guide d'installation et d'exploitation.

60831-2 (1995) Deuxième partie: Essais de vieillissement, d'auto-régénération et de destruction.

60871:– Condensateurs shunt pour réseaux à courant alternatif de tension assignée supérieure à 1 000 V.

60871-1 (1987) Première partie: Généralités – Caractéristiques fonctionnelles, essais et valeurs assignées – Règles de sécurité – Guide d'installation et d'exploitation.
Amendement n° 1 (1991).

60871-2 (1987) Deuxième partie: Essais d'endurance.
Amendement n° 1 (1991).

60871-3 (1996) Partie 3: Protection des condensateurs shunt et des batteries de condensateurs shunt.

60871-4 (1996) Partie 4: Fusibles internes.

60931: – Condensateurs shunt de puissance non autorégénérateurs pour réseaux à courant alternatif de tension assignée inférieure ou égale à 1 000 V.

60931-1 (1996) Partie 1: Généralités – Caractéristiques fonctionnelles, essais et valeurs assignées – Règles de sécurité – Guide d'installation et d'exploitation.

60931-2 (1995) Partie 2: Essais de vieillissement et de destruction.

60931-3 (1996) Partie 3: Fusibles internes.

60996 (1989) Méthode de vérification de la précision des mesures de la tangente de l'angle de pertes applicable aux condensateurs.

61071: – Condensateurs pour l'électronique de puissance.

61071-1 (1991) Partie 1: Généralités.

61071-2 (1994) Partie 2: Prescriptions pour l'essai de déconnexion des coupe-circuit, essai de destruction, essai d'auto-régénération et essai d'endurance.

61270-1 (1996) Condensateurs pour les fours à micro-ondes – Partie 1: Généralités.

61642 (1997) Réseaux industriels à courant alternatif affectés par les harmoniques – Emploi de filtres et de condensateurs shunt

IEC publications prepared by Technical Committee No. 33

60110 (1973) Recommendation for capacitors for inductive heat generating plants operating at frequencies between 40 and 24 000 Hz.

60143 (1992) Series capacitors for power systems.

60143-2 (1994) Part 2: Protective equipment for series capacitors banks.

60252 (1993) A.C. motor capacitors.

60358 (1990) Coupling capacitors and capacitor dividers.

60593 (1977) Internal fuses and internal overpressure disconnectors for shunt capacitors.
Amendment No. 2 (1986).

60594 (1977) Internal fuses and internal overpressure disconnectors for capacitors for inductive heat generating plants.
Amendment No. 2 (1987).

60595 (1977) Internal fuses for series capacitors.
Amendment No. 2 (1987).

60831: – Shunt power capacitors of the self-healing type for a.c. systems having a rated voltage up to and including 1 000 V.

60831-1 (1996) Part 1: General – Performance, testing and rating – Safety requirements – Guide for installation and operation.

60831-2 (1995) Part 2: Ageing test, self-healing test and destruction test.

60871:– Shunt capacitors for a.c. power systems having a rated voltage above 1 000 V.

60871-1 (1987) Part 1: General – Performance, testing and rating – Safety requirements – Guide for installation and operation.
Amendment No. 1 (1991).

60871-2 (1987) Part 2: Endurance testing.
Amendment No. 1 (1991).

60871-3 (1996) Part 3: Protection of shunt capacitors and shunt capacitor banks.

60871-4 (1996) Part 4: Internal fuses.

60931: – Shunt power capacitors of the non-self-healing type for a.c. systems having a rated voltage up to and including 1 000 V.

60931-1 (1996) Part 1: General – Performance, testing and rating – Safety requirements – Guide for installation and operation.

60931-2 (1995) Part 2: Ageing test and destruction test.

60931-3 (1996) Part 3: Internal fuses.

60996 (1989) Method for verifying accuracy of tan delta measurements applicable to capacitors.

61071: – Power electronic capacitors.

61071-1 (1991) Part 1: General.

61071-2 (1994) Part 2: Requirements for disconnecting test on fuses, destruction test, self-healing test and endurance test.

61270-1 (1996) Capacitors for microwave ovens – Part 1: General.

61642 (1997) Industrial a.c. networks affected by harmonics – Application of filters and shunt capacitors.

ISBN 2-8318-3989-0



ICS 29.120.99; 29.240.99

Typeset and printed by the IEC Central Office
GENEVA, SWITZERLAND